

MEC-200

Session 2

Caractérisation des matériaux

Références
Chapitre 1 (p. 1–26, surtout 8–22)
Essais de traction – Figures 1.5, 1.7, 1.8, 1.9 et 10.10
Lire chap. 9 – Propriétés physiques
Lire section 7.6 (chocs thermiques)



MEC-200

Pourquoi caractériser les matériaux?

- La caractérisation des matériaux c'est la quantification des propriétés :
  - Mécaniques
  - Électriques
  - Thermiques, etc.
- Déterminer les données à utiliser en conception
  - Est-ce qu'une pièce va casser?
  - Est-ce qu'une pièce va se déformer?
- Vérifier l'effet des traitements effectués



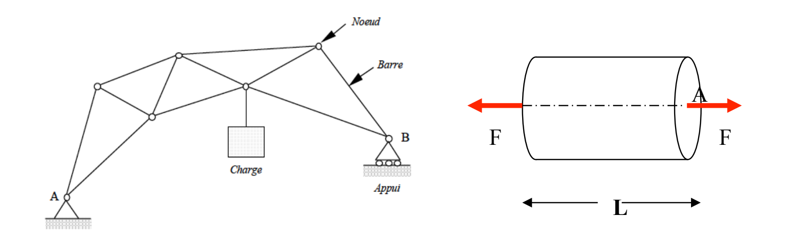
Caractérisation des matériaux

- Propriétés physiques
- Propriétés mécaniques
- Propriétés thermiques
- Propriétés électriques
- Propriétés magnétiques
- Propriétés dégradatives
- Microstructure



Objectifs du cours

- Déterminer le comportement mécanique des matériaux pour mieux les utiliser.
  - Concevoir des structures et des composantes avec des matériaux aux propriétés connues pour éviter des déformations inacceptables et des ruptures.

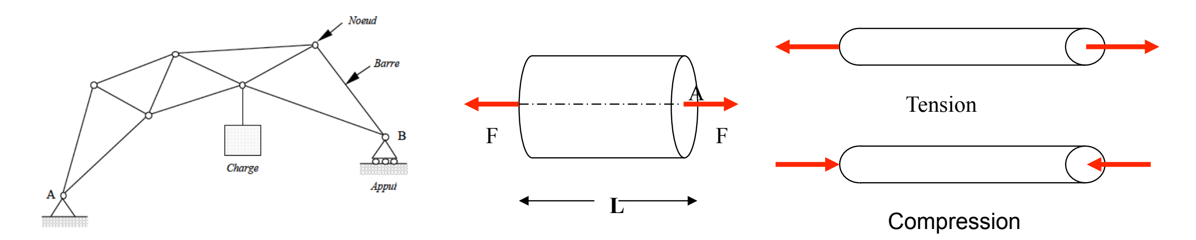


La force (charge axiale) qu'il faut appliquer pour rompre une membrure est-elle un bon indicateur de la *résistance* du matériau???



Objectifs du cours

- Déterminer le comportement mécanique des matériaux pour mieux les utiliser.
  - Concevoir des structures et des composantes avec des matériaux aux propriétés connues pour éviter des déformations inacceptables et des ruptures.





Objectifs du cours

- Déterminer le comportement mécanique des matériaux pour mieux les utiliser.
  - Concevoir des structures et des composantes avec des matériaux aux propriétés connues pour éviter des déformations inacceptables et des ruptures.
- Se familiariser avec des essais normalisés.



MEC-200

Plan du cours
Caractérisation des matériaux

- Propriétés mécaniques
  - Notions de contrainte et déformation
  - Caractérisation des propriétés mécaniques

  (traction, compression, flexion, dureté, impact, fatigue, fluage, facteur de sécurité)
- Caractérisation de la microstructure
  - Microscopie optique, transmission, balayage
- Autres propriétés
  - Densité
  - Dilatation, contrainte thermique, capacité calorifique, conductivité thermique
  - Propriétés électriques



MEC-200

Plan du cours
Caractérisation des matériaux

- Propriétés mécaniques
  - Notions de contrainte et déformation
  - Caractérisation des propriétés mécaniques

  (traction, compression, flexion, dureté, impact, fatigue, fluage, facteur de sécurité)
- Caractérisation de la microstructure
  - Microscopie optique, transmission, balayage
- Autres propriétés
  - Densité
  - Dilatation, contrainte thermique, capacité calorifique, conductivité thermique
  - Propriétés électriques



Indice de performance des structures

Tableau 15.1 Indice de performance de quelques éléments de structure en fonction de leur mode de chargement

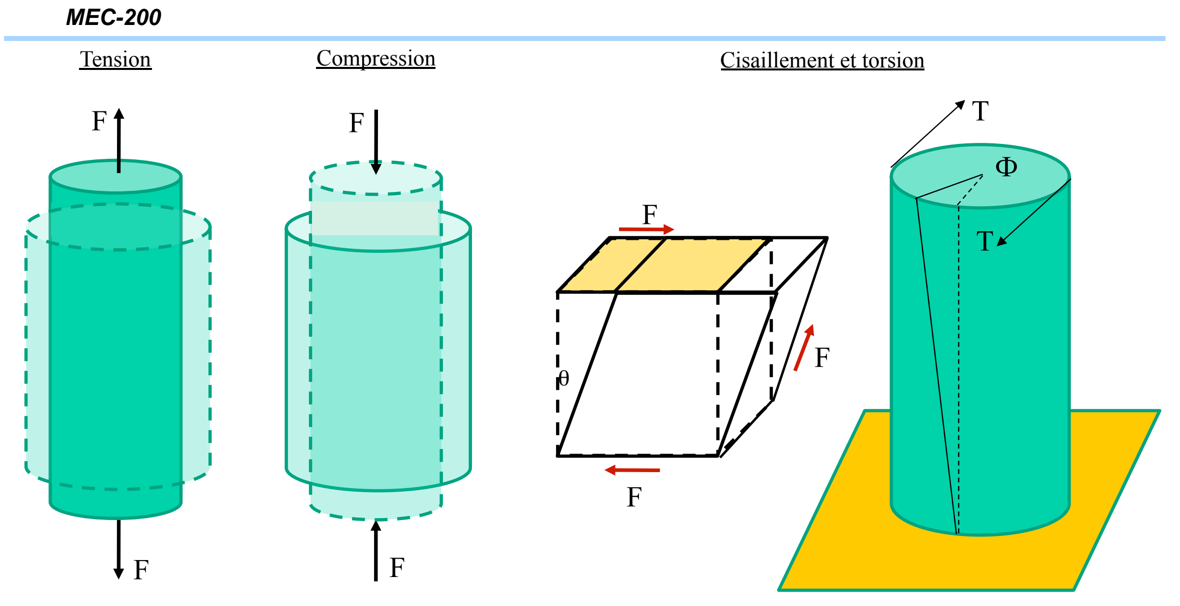
Type de structure (mode de chargement)	Indice de performance, P	
	Résistance mécanique	Déformation imposée
Parallélépipède (flexion)	$R_e^{1/2}/\rho$	$E^{1/3}/\rho$
Cylindre (torsion)	$R_e^{2/3}/\rho$	$G^{1/2}/\rho$
Cylindre (compression)	–	$E^{1/2}/\rho$
Récipient cylindrique (pression)	R_e/ρ	–

R_e : limite d'élasticité ; E : module d'Young ; G : module de cisaillement ; ρ : masse volumique.

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



Modes de sollicitation

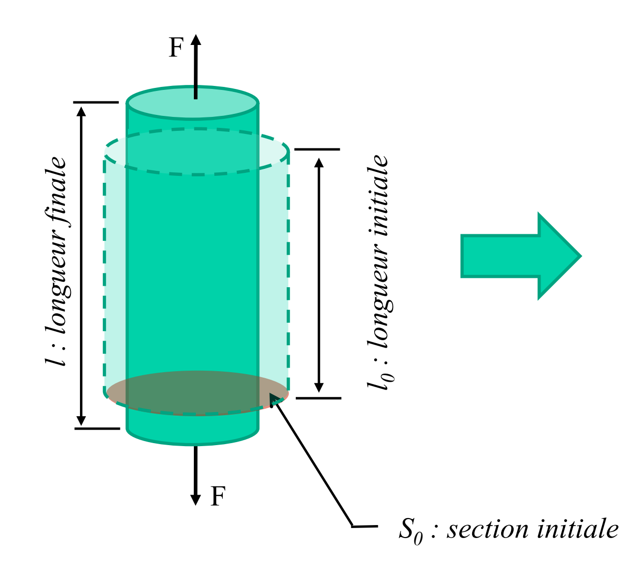




MEC-200

Traction

Notion de contrainte et déformation



Contrainte nominale

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Déformation conventionnelle

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Unités utilisées:

σ => Pa (N/m²) ou MPa (N/mm²)

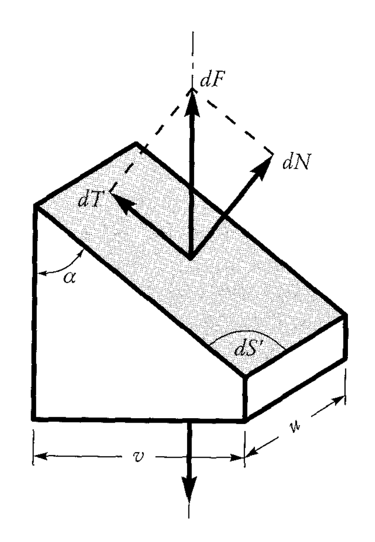
ε => (mm/mm) ou (%)



MEC-200

Considérations géométriques sur l'état des contraintes

Pour un plan qui n'est pas parallèle ou perpendiculaire à la charge



dF se décompose :

$$\sigma_n = \frac{dN}{dS'} \rightarrow \textit{contrainte normale}$$

$$\tau = \frac{dT}{dS'} \rightarrow \textit{contrainte tangentielle (cission)}$$



$$dS' = \frac{dS}{sin(\alpha)}$$

$$\sigma_n = \sigma_{nom} cos^2(\alpha)$$
$$\tau = \sigma_{nom} sin(\alpha) cos(\alpha)$$

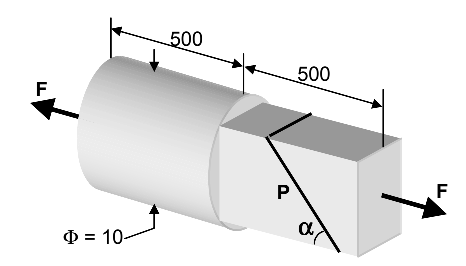
Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



Considérations géométriques sur l'état des contraintes

La barre représentée ci-dessous est soumise à une force axiale de traction égale à 14 500 N dans le domaine élastique. Son allongement élastique total est égal à 2 mm. Les données relatives au problème sont les suivantes :

- On néglige les concentrations possibles de contraintes;
- Les cotes sont données en millimètres.



a) Quelle est la contrainte nominale (en MPa) développée dans chacune des sections?

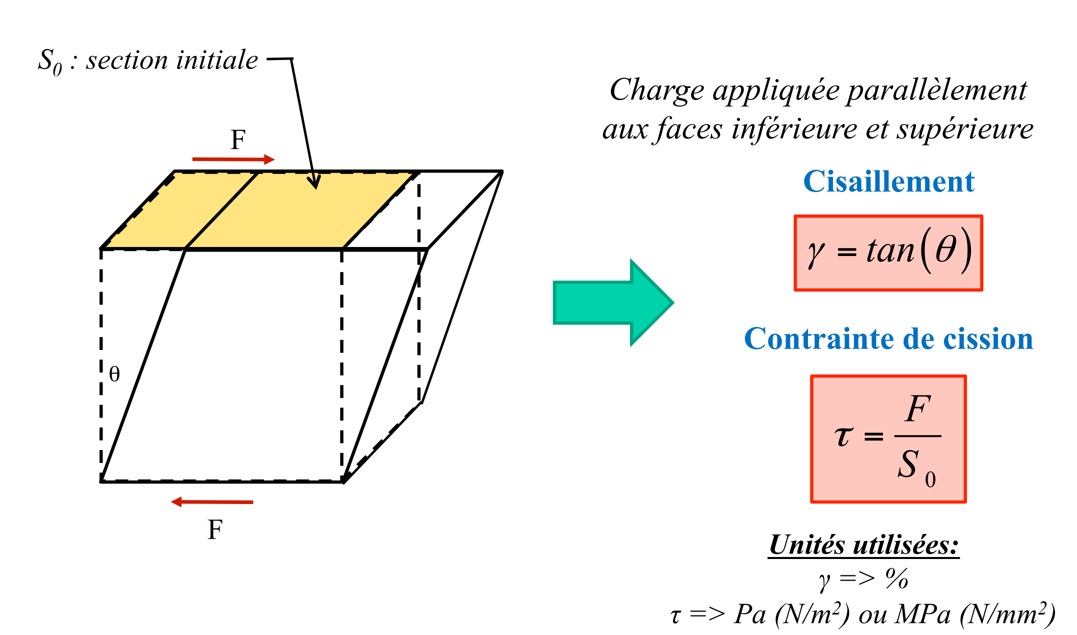
b) Quel est le module d'Young (en GPa) du matériau dont est faite cette barre?

c) Quelle est la valeur (en MPa) de la tension **σ** et de la cission **τ** s'exerçant dans le plan **P** incliné de **α** = 60° tel qu'indiqué sur la figure ?

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



Cission



Unités utilisées:

γ => %

τ => Pa (N/m^2) ou MPa (N/mm^2)

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



$$\frac{1lb}{po^2} = \frac{0,454x9,81N}{2,54x2,54x10^{-4}m^2} = 6903N/m^2$$



Plan du cours
Caractérisation des matériaux

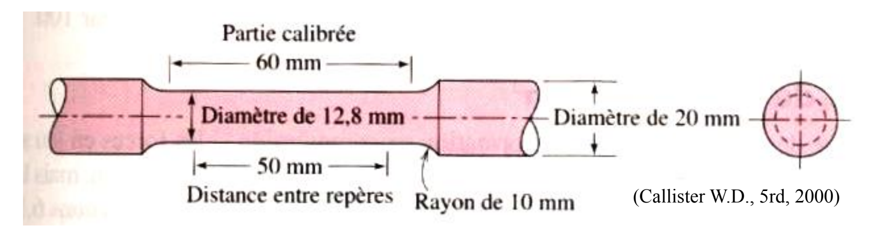
- Propriétés mécaniques
  - Notions de contrainte et déformation
  - Caractérisation des propriétés mécaniques

  (traction, compression, flexion, dureté, impact, fatigue, fluage, facteur de sécurité)
- Caractérisation de la microstructure
  - Microscopie optique, transmission, balayage
- Autres propriétés
  - Densité
  - Dilatation, contrainte thermique, capacité calorifique, conductivité thermique
  - Propriétés électriques



Essai de traction

- Un des essais mécaniques les plus fréquents
- Obtention de propriétés mécaniques importantes en conception : limite élastique, module de Young…
- Essais normalisés
    - ASTM : American Society for Testing and Materials
    - ISO : International Standardization Organisation
    - ACNOR : Association Canadienne de NORmalisation
    - BNQ : Bureau de Normalisation du Québec



(Callister W.D., 5rd, 2000)

Normes E 8 et E 8M de l'ASTM



Essai de traction

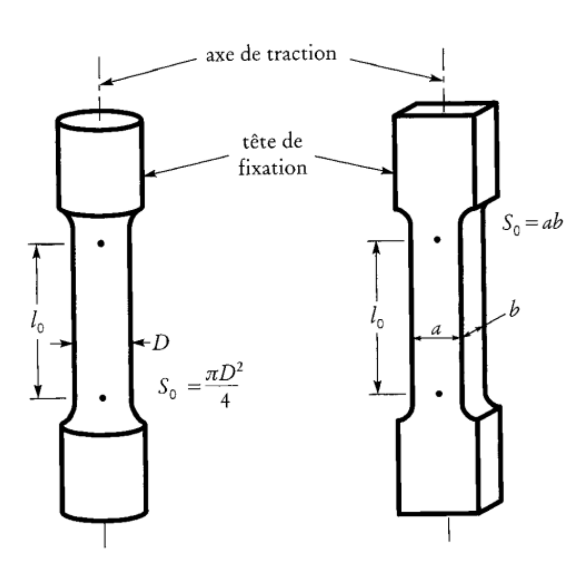


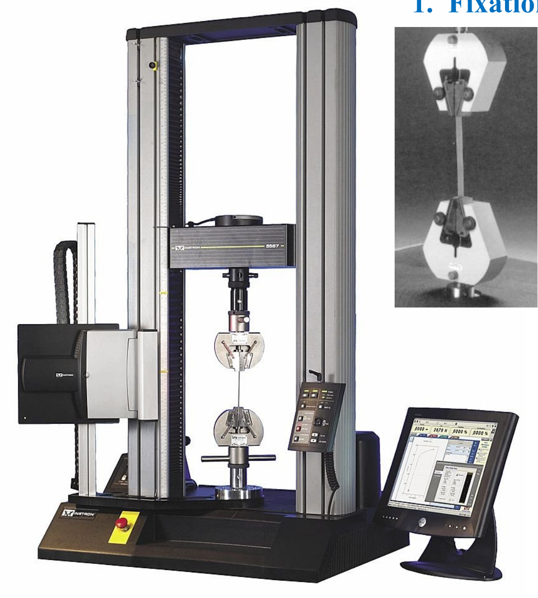
Figure 1.5 Éprouvettes de traction.

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



MEC-200

Machine de traction



1. **Fixation de l'échantillon**
2. **Application de la charge**
   - Manuel (volant)
   - Hydraulique
   - Électrique

3. Instrumentation

Extensiomètre



Cellule de charge



4. Acquisition des données

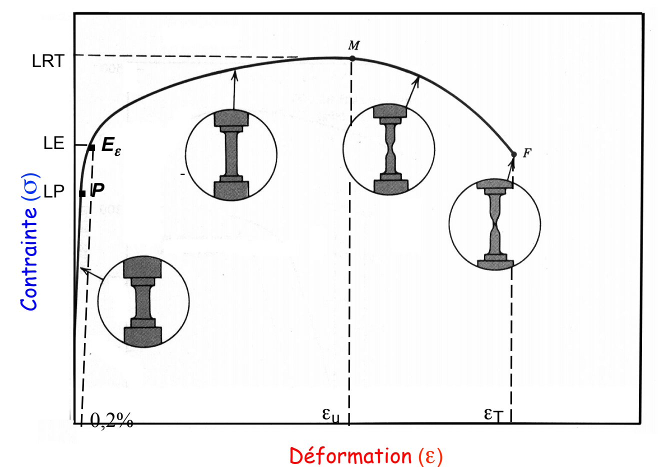




MEC-200

Courbe de traction

Contrainte (σ) vs Déformation (ε)
matériau metallique ductile



$\sigma = F / A_o$

$\varepsilon = (l - l_o) / l_o = \Delta l / l_o$

A_o: section transversale

F: force appliquée

l : longueur échantillon déformé

l_o: longueur iniciale

- O- P déformation élastique réversible
- P à F déformation plastique permanente
  - De P à M homogène
  - de M à F striction
- F: Rupture

- Tension au point E_ε: Limite d´élasticité ($R_{e0,2}$).
- Tension au point M: Résistance à traction (R_m).

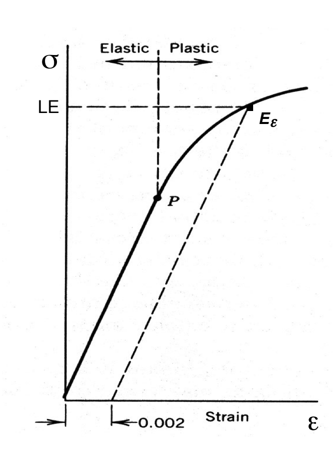
Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux



MEC-200

Comportement élastique

- Déformation élastique: réversible
- Eloignement des atomes: ne peut être modifié par traitement thermique

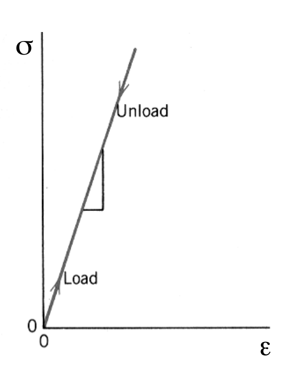


Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux



MEC-200

Comportement élastique

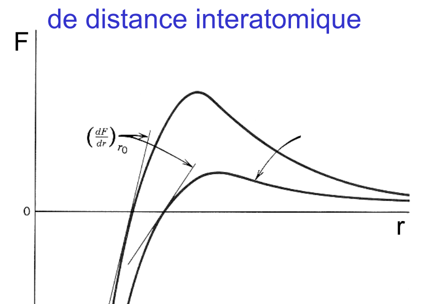


- MODULE D' ELASTICITÉ

(Loi de Hooke)

$$\sigma = E.\varepsilon$$

Force de liaison en fonction de distance interatomique



- Le module d'élasticité est proportionel à la valeur de dF/dr à $r = r_0$.
- O module d'élasticité donne une idée de l' intensité de la force de ligation entre deux atomes.

Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux



Déformation élastique

- **Élasticité : Propriété des matériaux qui reprennent leur forme initiale après que la force qui les déformait ait cessé d'agir.**

- Loi de Hooke :

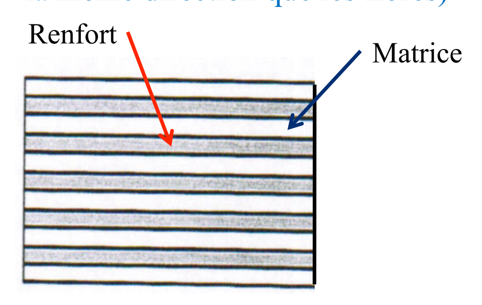
$$\sigma = E\varepsilon \text{ (en traction/compression)}$$

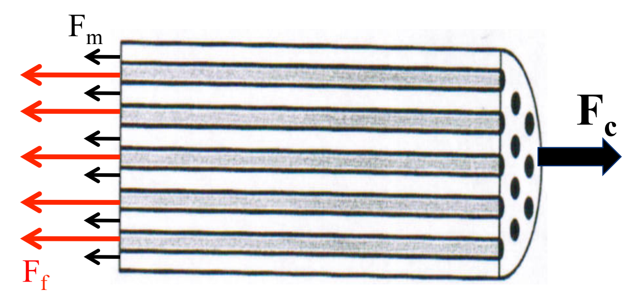
E : module d'élasticité
E est une mesure de la rigidité de matériau.
E = Pente de la courbe σ/ε dans le domaine élastique



Propriétés mécaniques

Cas d'un chargement longitudinal (dans la même direction que les fibres)

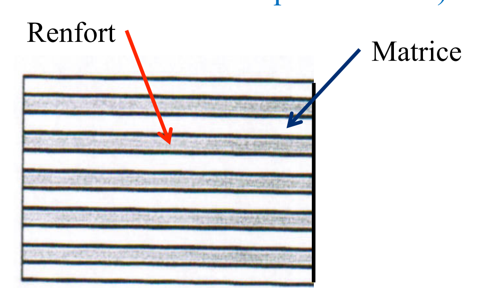


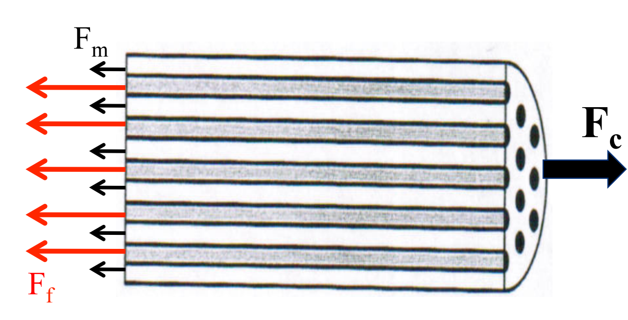




Propriétés mécaniques

Cas d'un chargement longitudinal (dans la même direction que les fibres)





Loi des mélanges

$$F_c = F_f + F_m$$

$$\sigma_f = \frac{F_f}{S_f},\ \sigma_m = \frac{F_m}{S_m}\ et\ \sigma_c = \frac{F_c}{S_c}$$

$$\Rightarrow \sigma_c = \frac{F_f + F_m}{S_c} = \sigma_f \frac{S_f}{S_c} + \sigma_m \frac{S_m}{S_c}$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

$$\left.\begin{array}{l} \sigma_f = E_f \varepsilon_f \\ \sigma_m = E_m \varepsilon_m \\ \sigma_c = E_c \varepsilon_c \end{array}\right\} \Rightarrow \text{loi de Hooke}$$

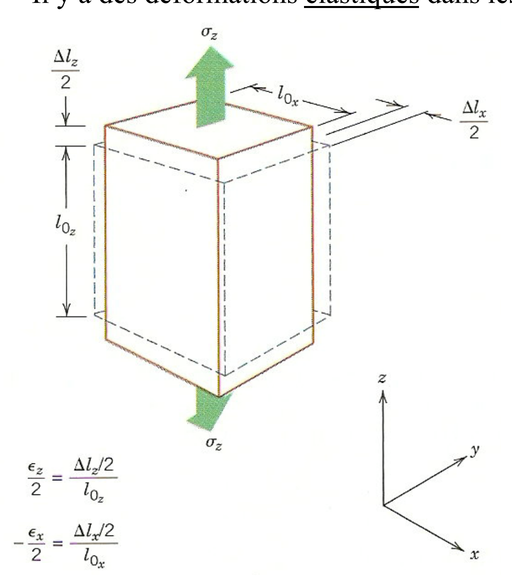
$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} V_f$$

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f = E_m \left(1 - V_f\right) + E_f V_f$$



Coefficient de Poisson ν

Il y a des déformations élastiques dans les directions où il n'y a pas de forces appliquées



$$\varepsilon_z = \Delta L_z / L_{0z} \quad \textit{(allongement)}$$

$$\varepsilon_x = \Delta L_x / L_{0x} \quad \textit{(racourcissement)}$$

$$\varepsilon_y = \Delta L_y / L_{0y} \quad \textit{(racourcissement)}$$

Coefficient de Poisson ν

Rapport entre déformations latérale et axiale

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

A prendre en compte dans les cotes (ex: rétrécissement d'une poutre sous l'effet d'une traction)

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux

Coefficient de Poisson ν

- On applique une contrainte de traction le long de l' axe longitudinal d' une tige cylindrique en laiton dont le diamêtre est 10 mm. Calculez la charge nécessaire pour rétrécir le diamêtre de 2,5 x 10^{-3} mm si la déformation est entièrement élastique.
- Le coefficient de poisson est 0,34 et le module d' élasticité 97GPa.

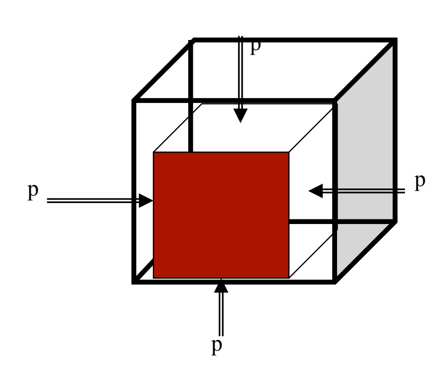
Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux



MEC-200

Autres mesures de la rigidité

- E : module d'Young.
- G : module de cisaillement en torsion (Module de Coulomb) ($\tau = G\,\gamma$)
- K : module de compressibilité volumique



$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$ (Gpa)

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$ (Gpa)

ν: coefficient de Poisson



Exemples

Alliage	Module d'élasticité E (GPa)	Module de cisaillement G (GPa)	Coefficient de Poisson
Acier	207	83	0.3
Aluminium	69	25	0.33
Cuivre	110	46	0.34
Laiton	97	37	0.34
Magnésium	45	17	0.29
Nickel	207	76	0.31
Titane	107	45	0.34
Tungstène	407	160	0.28

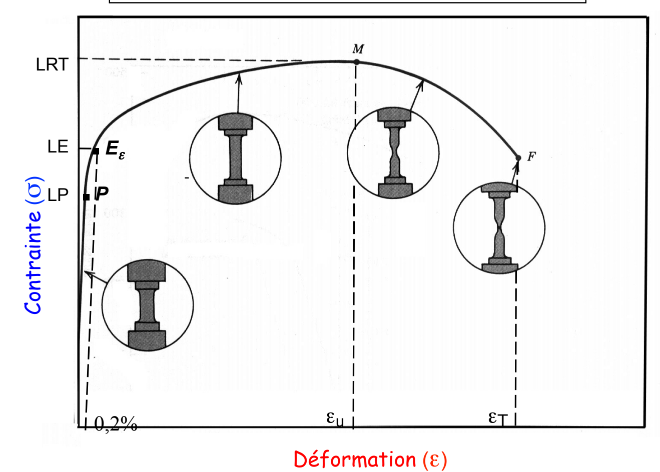
$\nu \approx 0{,}3$ métaux

$\nu \approx 0{,}5$ polymères



Courbe de traction

Contrainte (σ) vs Déformation (ε)
matériau metallique ductile



$\sigma = F / A_o$

$\varepsilon = (l - l_o) / l_o = \Delta l / l_o$

A_o: section transversale

F: force appliquée

l : longueur échantillon déformé

l_o: longueur iniciale

- O- P déformation élastique réversible
- P à F déformation plastique permanente
  - De P à M homogène
  - de M à F striction
- F: Rupture

- Tension au point E_ε: Limite d´élasticité ($R_{e0,2}$).
- Tension au point M: Résistance à traction (R_m).

Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux



MEC-200

Déformation plastique

- Déformation non réversible
- La contrainte n'est plus proportionnelle à la déformation (loi de Hooke plus valide)
- **Ductilité : Qualité des matériaux à être déformés de façon permanente sans se rompre**

La ductilité d'un matériau se mesure par son allongement à la rupture (A%) ou par la striction à la rupture (Z%)

Allongement à la rupture

$$A\% = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100$$

L_0 (L_f) longueurs initiales (finales) de l'éprouvette

Striction à la rupture

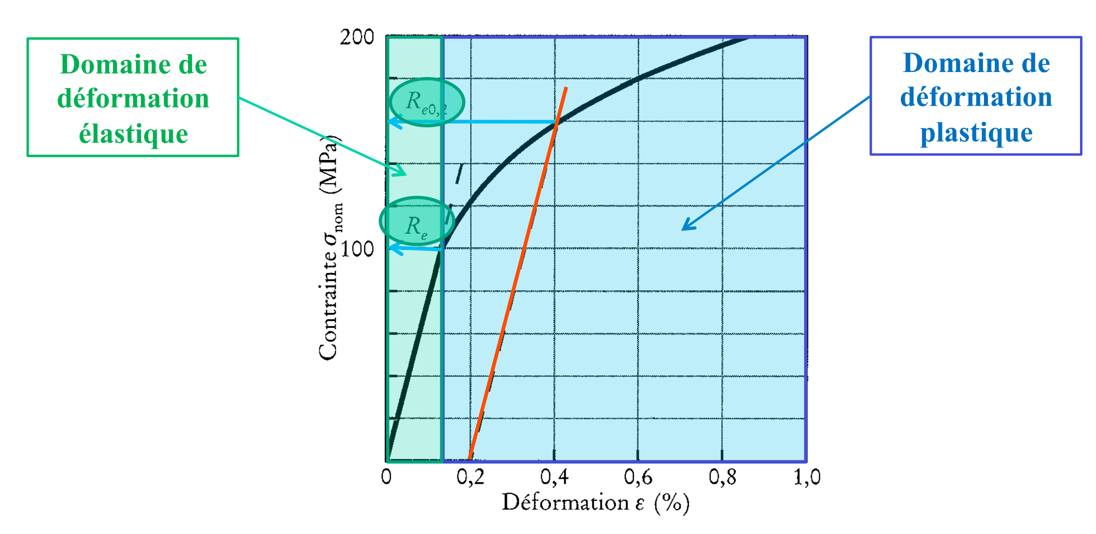
$$Z\% = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \cdot 100$$

S_0 (S_f) sections initiales (finales) de l'éprouvette



MEC-200

Détermination de la limite élastique (Yield strength) (Re ou Sy)

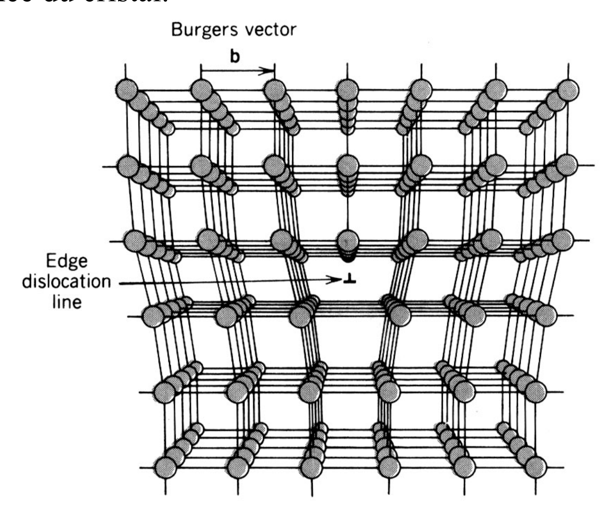


R_e : limite élastique vraie

$R_{e\ 0.2}$: limite conventionnelle d'élasticité

Dislocations

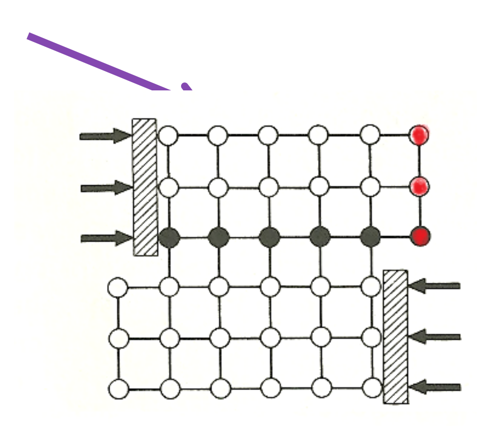
- Une dislocation est l'introduction d'un demi-plan supplémentaire.
- C'est un défaut linéaire qui définit la frontière entre une région déformée et non-déformée du cristal.



Rappels: déformation plastique

La déformation plastique se fait par déplacement des dislocations

Dislocation coin



Sous l´action de la cission la dislocation bouge progressivement dans le crystal

Si le déplacement des dislocations est difficulté le matériau deviendra plus dur



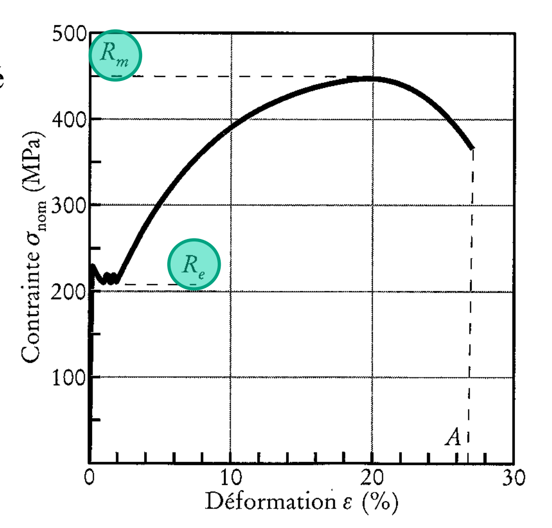
MEC-200

Courbe de traction d'un acier doux

Phénomène d'écoulement plastique à la limite d'élasticité R_e => plateau bas

R_m: résistance à la traction => Contrainte max. atteinte

A % : allongement à la rupture ($\neq \varepsilon_r$)



Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



MEC-200

Propriétés mécaniques de quelques métaux et alliages

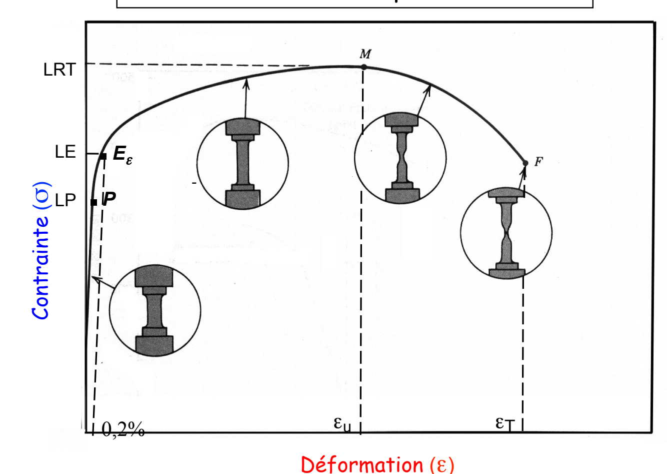
Alliage	Limite conventionnelle d'élasticité $R_{e\,0.2}$ (MPa)	Résistance à la traction R_m (MPa)	Allongement à la rupture A (%)
Acier (1020)	180	380	25
Aluminium	**35**	**90**	40
Cuivre	69	200	45
Fer	130	262	45
Laiton	75	300	**68**
Molybdène	565	655	35
Nickel	138	480	40
Titane	**450**	**520**	25



MEC-200

Courbe de traction

Contrainte (σ) vs Déformation (ε)
matériau metallique ductile



Déformation (ε)

- Tension au point E_ε: Limite d´élasticité ($R_{e0,2}$).
- Tension au point M: Résistance à traction (R_m).

$\sigma = F / A_o$

$\varepsilon = (l - l_o) / l_o = \Delta l / l_o$

A_o: section transversale
F: force appliquée
l : longueur échantillon déformé
l_o: longueur iniciale

- O- P déformation élastique réversible
- P à F déformation plastique permanente
  - De P à M homogène
  - de M à F striction
- F: Rupture

Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux



MEC-200

Déformations et contraintes réelles

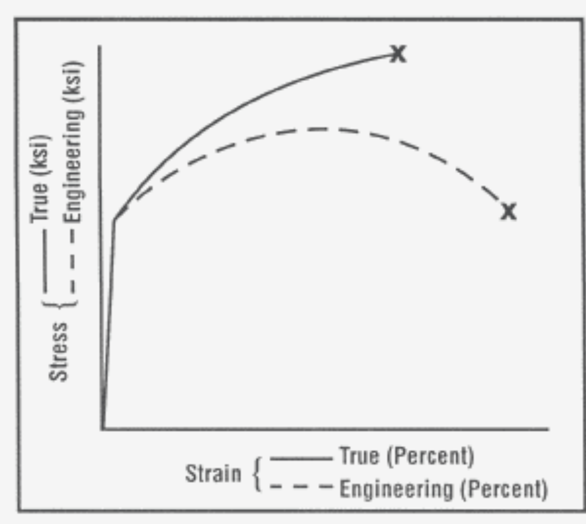


Figure 2-8 — Comparison of true stress-true strain curve with an engineering stress-strain curve. True stress-strain shows continuous increase to failure.

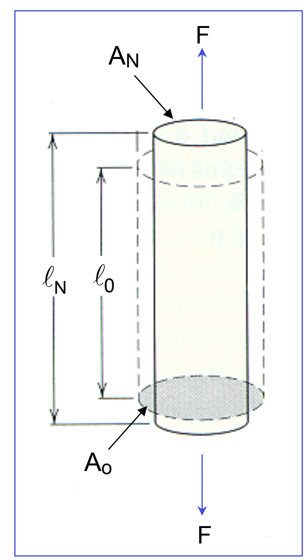
Source: Auto Steel Partnerhip web



MEC-200

Contraintes réelles

- A chaque instant t, la contrainte réelle σ_R est définie comme la Force appliquée sur la surface transversale [A=A(t)].



$$\sigma_R = \frac{F}{A}$$

- La contrainte nominale est donnée par :

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$\therefore \quad \sigma_R = \frac{F}{A_0}\frac{A_0}{A} = \sigma \frac{A_0}{A}.$$

- Pour des matériaux incompréssibles pour lesquels le volume est constant nous aurons :ℓ

$$A_0\,\ell_0 = A\,\ell \;\Rightarrow\; \frac{A_0}{A} = \frac{\ell}{\ell_0} = \varepsilon + 1 \;\Rightarrow\; \sigma_R = \sigma(\varepsilon + 1)$$

Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux



MEC-200

Déformations et contraintes réelles

Relations entre contraintes réelle et nominale et déformations réelle et conventionnelle :

$$\varepsilon_r = ln(1+\varepsilon) \qquad \sigma_r = \sigma(1+\varepsilon)$$

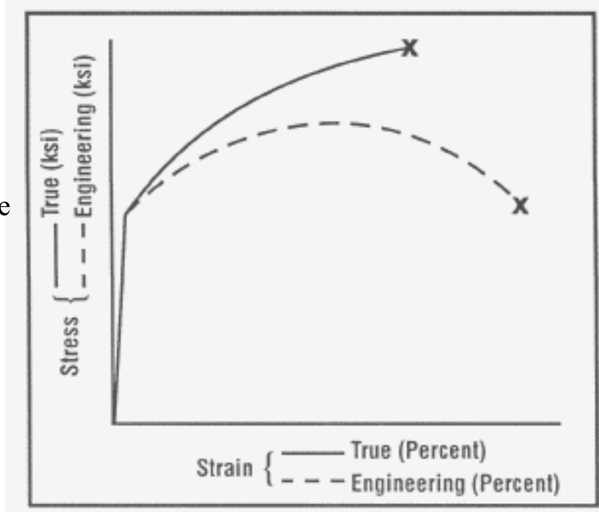


Figure 2-8 — Comparison of true stress-true strain curve with an engineering stress-strain curve. True stress-strain shows continuous increase to failure.

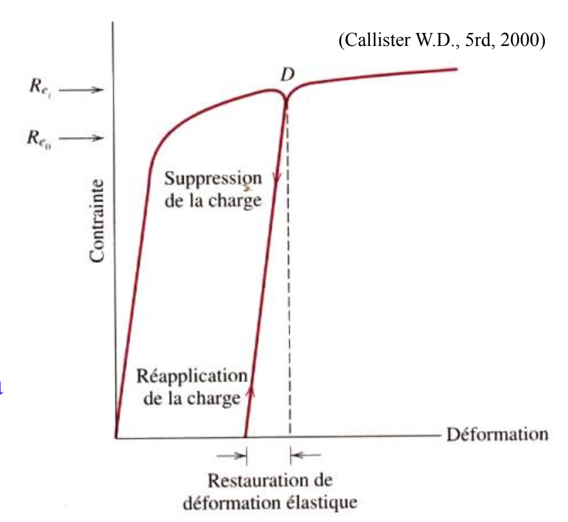
Source: Auto Steel Partnerhip web

Restauration élastique durant la déformation plastique

Lorsque l'on supprime la charge durant un essai de traction, une fraction de la déformation totale est éliminée par déformation élastique : c'est la restauration élastique.

Le même phénomène se produit à la rupture du matériau (d'où A% ≠ ε_r)

(Callister W.D., 5rd, 2000)



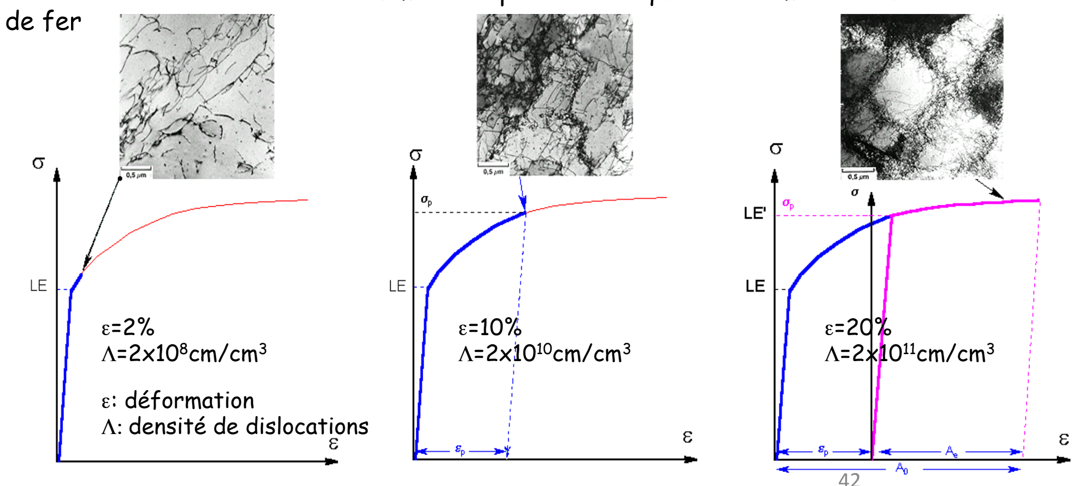
Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux



Travail à froid - écrouissage

Au cours de la déformation plastique, les dislocations se déplacent et se multiplient, forment des empilements, des noeuds et leur mouvement est de plus en plus difficile. Il faut donc une contrainte plus élevée pour que les dislocations se déplacent et pour une nouvelle déformation plastique

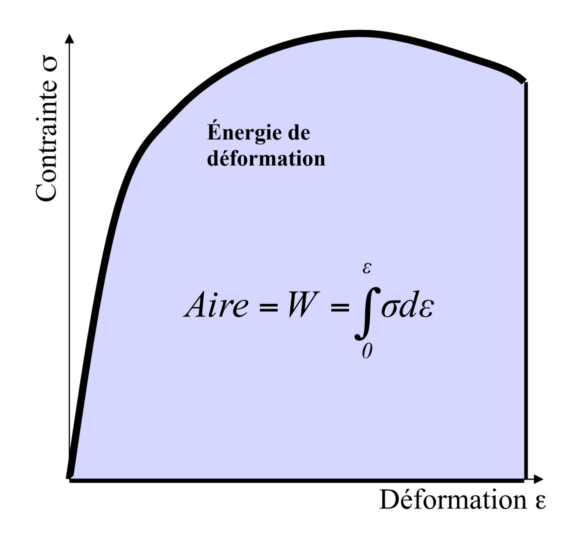
Observation des dislocations au microscope électronique à transmission sur des échantillons de fer

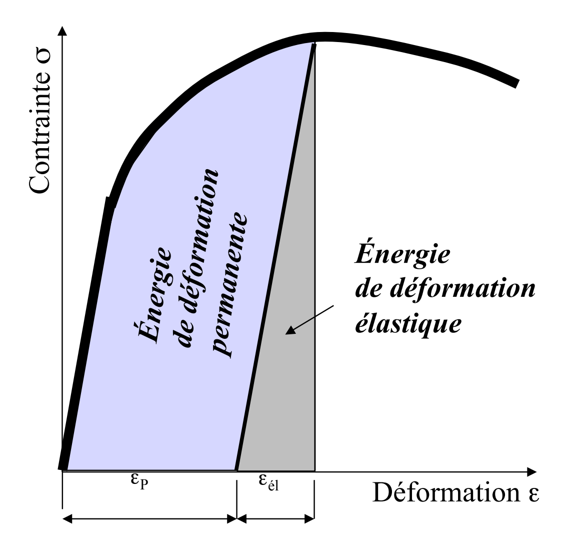


Source: Baïlon et Dorlot, Des Matériaux



Énergie de déformation



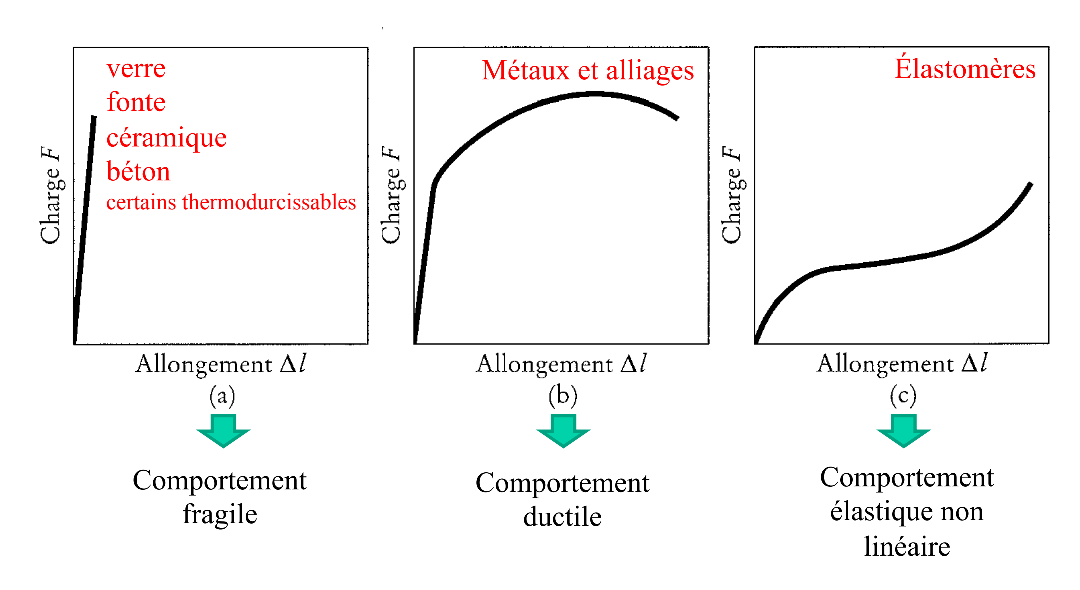


Dans le domaine élastique

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2}\sigma\varepsilon = \frac{\sigma^2}{2E}$$

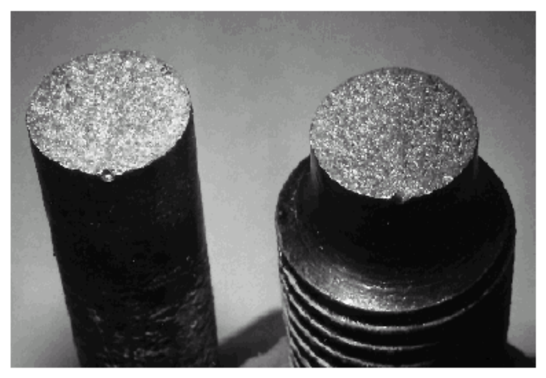


Comportement en traction des matériaux

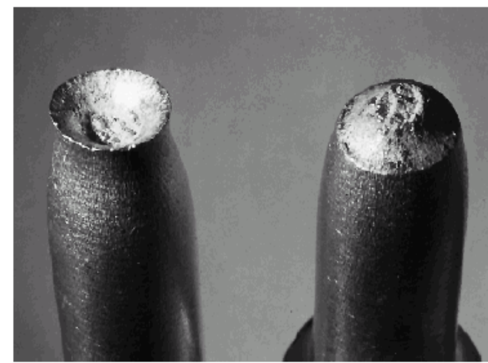




Rupture fragile - ductile

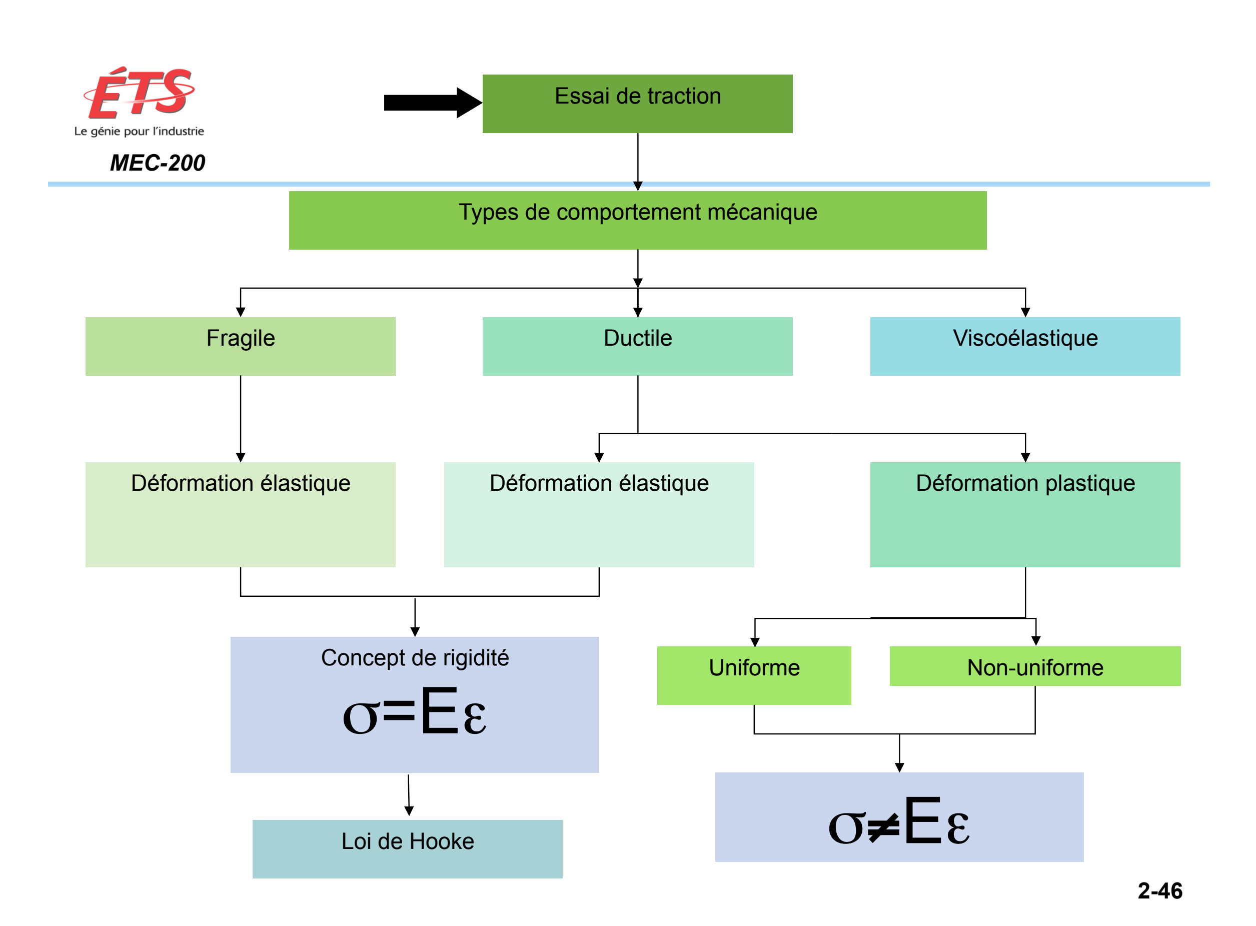


Rupture fragile



Rupture ductile : striction, déformation plastique

Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux

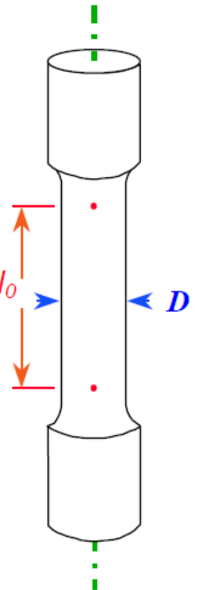


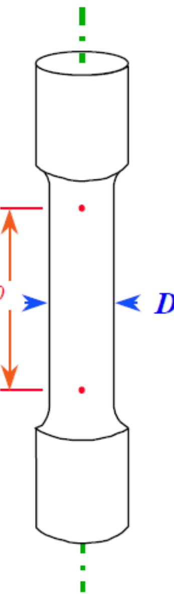


Exercice

EXERCICE 1-10

On réalise un essai de traction sur une éprouvette d'un matériau de section circulaire (D = 6 mm, l_0 = 100 mm). Voici quelques données expérimentales enregistrées au cours de cet essai de traction :





- Sous une force F_1 de 5 kN, la distance entre les points de référence est égale à 100,6 mm;
- Si la force est supprimée, la distance entre les points de référence est égale à 100,2 mm;
- Au maximum de la courbe brute de traction, la force F_{max} est égale à 7 kN et la distance entre les points de référence est égale à 112 mm;
- La rupture se produit sous une force F_f de 6,5 kN et, après la rupture de l'éprouvette, la distance entre les points de référence est égale à 114 mm;

À partir de ces données, on vous demande caractériser le comportement en traction de ce matériau et de calculer :

a) Sa limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ (en MPa).

b) Son module d'Young E (en GPa).

c) Sa résistance à la traction R_m (en MPa).

d) Son allongement après rupture A (en %).

e) La déformation A_M (en %) qui est la borne supérieure du domaine de déformation plastique homogène de ce matériau.

f) L'énergie élastique $W_{él}$ (en kJ/m^3) qui était emmagasinée par unité de volume de matériau juste avant sa rupture .



Exercice

MEC-200

EXERCICE 1-14

Voici des données expérimentales partielles acquises après avoir réalisé un essai de traction sur un matériau métallique:

- Éprouvette de traction cylindrique de diamètre initial D_0 = 10,000 mm et de longueur initiale (distance entre les points de référence) l_0 = 100,00 mm.
- Sous une force F_1 = 11 000 N, la distance l entre les points de référence est égale à 100,40 mm.
- Si la force F_1 est alors supprimée, la distance l entre les points de référence est égale à 100,20 mm.
- Sous une force F_2 = 7 854 N, le diamètre D de l'éprouvette est égal à 9,995 mm.
- Sous une force F_3 = 5 000 N, le rapport de l'énergie élastique emmagasinée dans ce matériau à l'énergie élastique emmagasinée dans une éprouvette de fer (Fe) de mêmes dimensions (D_0, l_0) initiales est égal à 3.
- La force maximale atteinte pendant l'essai de traction est F_{max} = 19 630 N.
- La longueur finale l_f après rupture est égale à 128,4 mm.

Après avoir schématiquement dessiné la courbe de traction du matériau, déterminez les grandeurs suivantes, caractéristiques de ce matériau :

a) La valeur (en GPa) du module d'Young E du matériau.

b) La valeur (en MPa) de la limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ du matériau.

c) La valeur du coefficient de Poisson ν du matériau.

d) La valeur (en MPa) de la résistance à la traction R_m du matériau.

e) La valeur (en %) de l'allongement à la rupture A du matériau.

f) Quel est ce matériau métallique, qui est fréquemment utilisé?

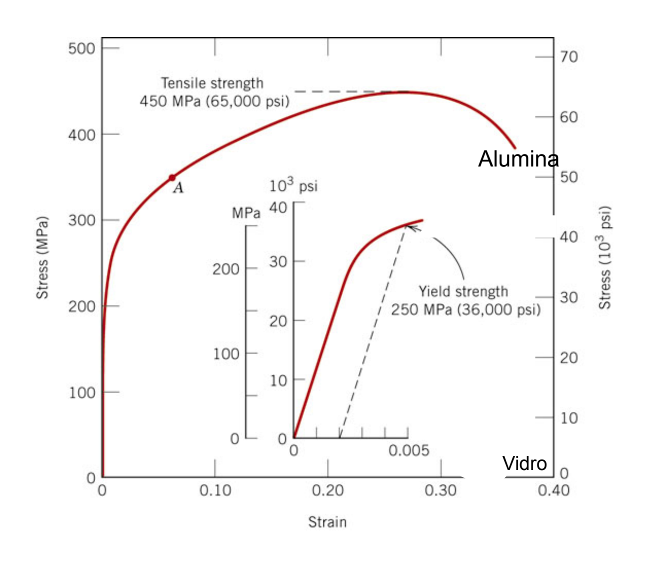


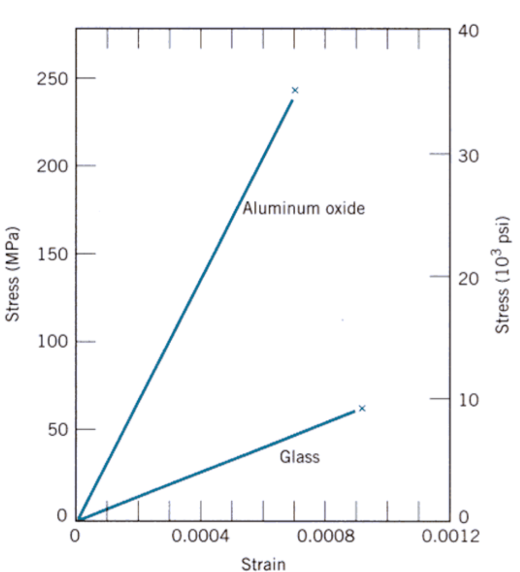
Résumé des choses importantes

- Test
- Courbe Typique
  - Comportement élastique, module d'élasticité (origine, comment le modifier), coefficient de Poisson et autres modules
  - Déformation plastique, limite d' élasticité, résistance à traction, allongement à la rupture, origine (cas particulier des aciers doux)
  - Déformation et contraintes réelles
  - Écrouissage
  - Ductilité



MEC-200







MEC-200

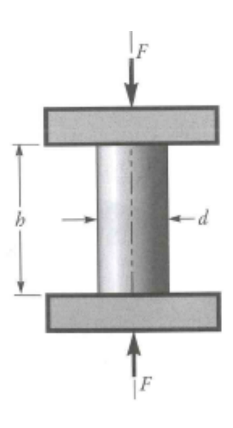
Plan du cours
Caractérisation des matériaux

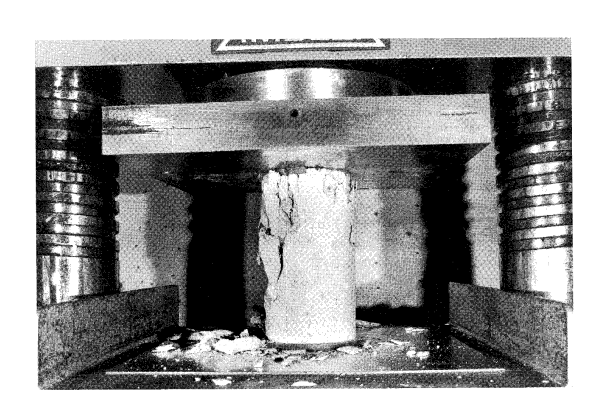
- Propriétés mécaniques
  - Notions de contrainte et déformation
  - Caractérisation des propriétés mécaniques

  (traction, compression, flexion, dureté, impact, fatigue, fluage, facteur de sécurité)
- Caractérisation de la microstructure
  - Microscopie optique, transmission, balayage
- Autres propriétés
  - Densité
  - Dilatation, contrainte thermique, capacité calorifique, conductivité thermique
  - Propriétés électriques

Essai de compression

- **Principe**
  - Compression de l'échantillon entre 2 plateaux
  - Acquisition de la force appliquée et de la déformation de l'échantillon





Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux

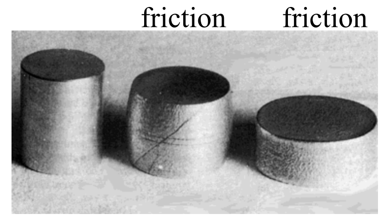
Essai de compression

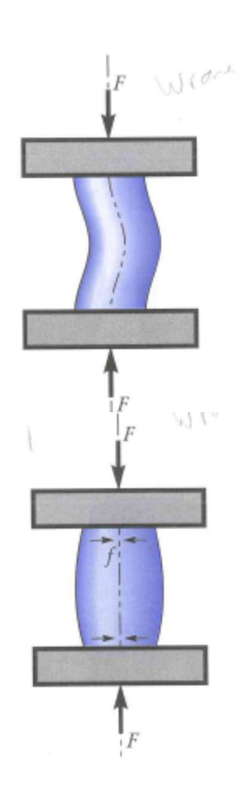
• **2 principales difficultés :**

• Flambage => instabilité élastique

Condition : $\frac{L}{D} < 3$

Avec friction | Sans friction





•Frottement => déformation hétérogène (forme de tonneau)

Friction entre les extrémités de l'échantillon et les plateaux de la machine.

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



Essai de compression

Avantages

-Très utile pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (difficile à caractériser en traction)

-Éprouvette à géométrie simple (section constante, peu d'usinage)

Inconvénients

-Attention, impossible de rompre les matériaux ductiles en compression

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



Plan du cours
Caractérisation des matériaux

- Propriétés mécaniques
  - Notions de contrainte et déformation
  - Caractérisation des propriétés mécaniques

  (traction, compression, flexion, dureté, impact, fatigue, fluage, facteur de sécurité)
- Caractérisation de la microstructure
  - Microscopie optique, transmission, balayage
- Autres propriétés
  - Densité
  - Dilatation, contrainte thermique, capacité calorifique, conductivité thermique
  - Propriétés électriques

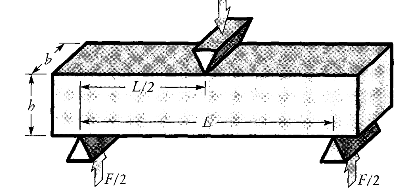


Essais de flexion

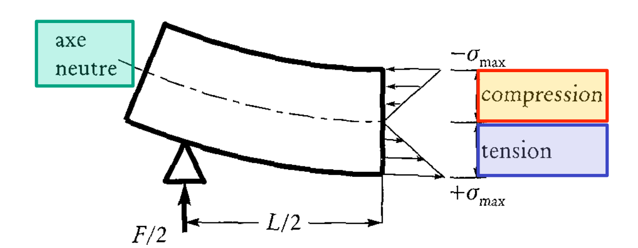
Pour les matériaux fragiles impossible de réaliser un essai de traction

Flexion à 3 points

$$\sigma_{\max} = \pm\frac{3}{2}\left(\frac{F \cdot L}{bh^2}\right)$$



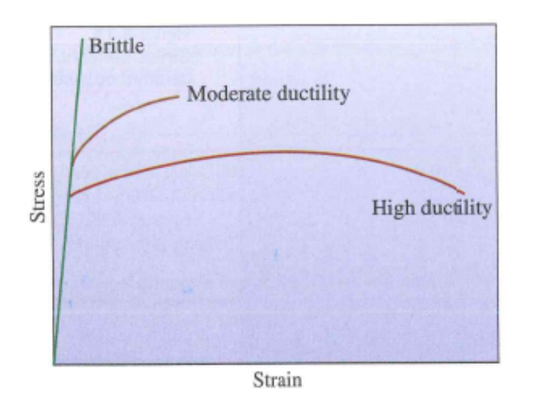
F: charge appliquée au centre
L: longueur entre les appuis
h : hauteur de l'éprouvette
b : largeur de l'éprouvette



Axe neutre => contrainte nulle (plan coupant l'éprouvette en 2)
Surface supérieure => contrainte max en compression
Surface inférieure => contrainte max en tension

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux

Essais de flexion



Ne permet pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles mais détermination de E (par mesure de la flèche)

Très utilisé en contrôle qualité

• Détermination de la contrainte à la rupture des matériaux fragiles.

•ASTM E 855: "Standard Test Methods of Bend Testing of Metallic Flat Materials for Spring Applications Involving Static Loading,"

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



Essais de flexion

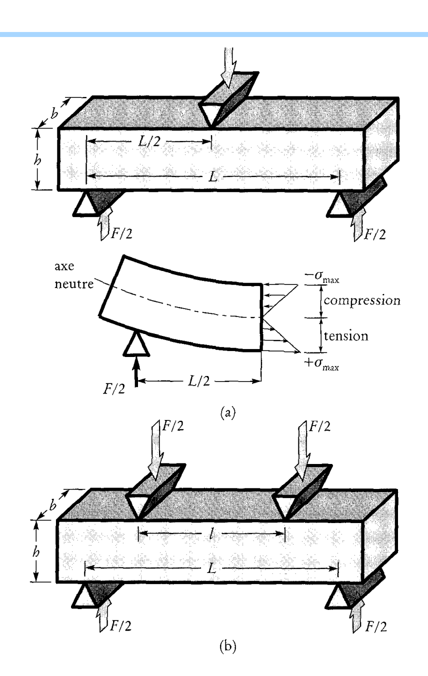
Flexion à 3 points

$$\sigma_{max} = \pm \frac{3}{2}\left(\frac{F \cdot L}{bh^2}\right)$$

F: charge appliquée au centre
L: longueur entre les appuis
h : hauteur de l'éprouvette
b : largeur de l'éprouvette

Flexion à 4 points

$$\sigma_{max} = \pm \frac{3}{2}\left(\frac{F(L-l)}{bh^2}\right)$$





MEC-200

Essais de flexion

Matériaux	Résistance traction (psi)	Résistance en compression (psi)	Résistance à la flexion (psi)
Polyester – 50% fibres de verre	23.000	32.000	45.000
Al_2O_3	30.000	375.000	50.000

Source: D.R. Askerland, P.P.Phulé The science and Engineering of Materials





MEC-200

Plan du cours
Caractérisation des matériaux

- Propriétés mécaniques
  - Notions de contrainte et déformation
  - Caractérisation des propriétés mécaniques

  (traction, compression, flexion, dureté, impact, fatigue, fluage, facteur de sécurité)
- Caractérisation de la microstructure
  - Microscopie optique, transmission, balayage
- Autres propriétés
  - Densité
  - Dilatation, contrainte thermique, capacité calorifique, conductivité thermique
  - Propriétés électriques

La dureté (Hardness)

- La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration.
- 1er classification : échelle de Mohs

La pénétration met en jeu:
- les déformations élastique et plastique.
- Le frottement entre le pénétrateur et le matériau.
- La géométrie du pénétrateur.
- la charge appliquée.

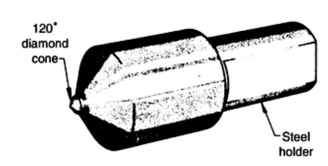
Echelle de Mohs

Dureté	Minéral	Test
1	Talc	Friable sous l'ongle
2	Gypse	Rayé par l'ongle
3	Calcite	Rayé par une pièce de monnaie
4	Fluorite	Facilement rayable avec un couteau
5	Apatite	Rayé au couteau
6	Orthose	Rayé avec une lime
7	Quartz	Raye une vitre
8	Topaze	Rayé par des outils au tungstène
9	Corindon	Rayé par le carbure de silicium
10	Diamant	Rayé par un autre diamant

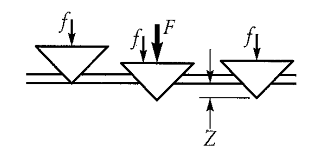
Dureté Rockwell (HR..)

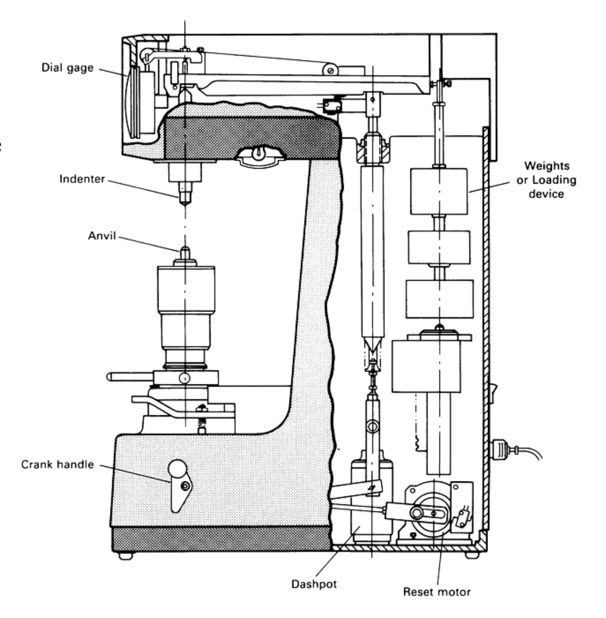
Méthode couramment utilisée:

- Plusieurs échelles (A, B, C…) possibles en fonction de l'indenteur et de la charge



- Dureté est mesurée par la différence de profondeur de pénétration







Dureté Rockwell (HR..)

Échelle	Indenteur	Charge (kg)	Symbole	Matériaux
A	Cône en diamant	60	HRA	Carbures Matériaux très durs
B	Bille d'acier 1/16	100	HRB	Bronze et alu Aciers doux
C	Cône en diamant	150	HRC	Aciers à haute résistance
D	Cône en diamant	100	HRD	Aciers à haute résistance
E	Bille d'acier 1/8	100	HRE	Matériaux très mous
F	Bille d'acier 1/16	60	HRF	Alliages de cuivre revenu Tôle de métal, Al
G	Bille d'acier 1/16	150	HRG	Cupro-nickel Alliages de Cu-Ni-Zn



Dureté Brinell (HB)

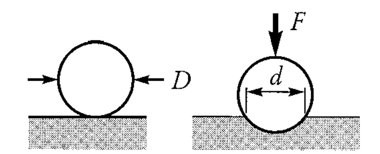
Similaire à la méthode Rockwell

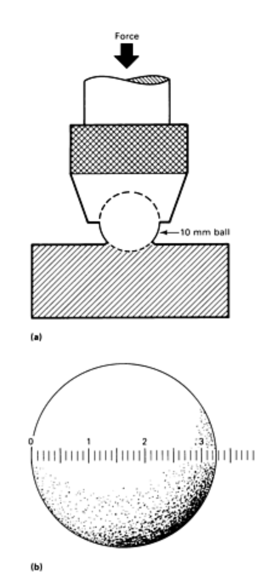
- Pénétrateur = sphère en acier trempé
- Différentes charges possibles : 500 → 3000kg

Calcul de la dureté Brinell

- Fonction de la charge et du diamètre de l'indentation résultante

$$HB = \frac{2F}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$



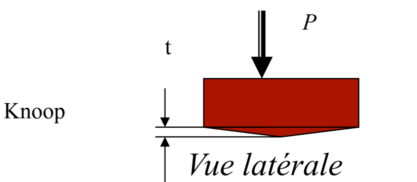


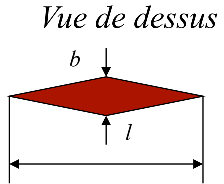


MEC-200

Microdureté Knoop (HK)

pénétrateur en cône de diamant; P faible (25 g à 5kg)





l/b =7.1
b/t = 4.0

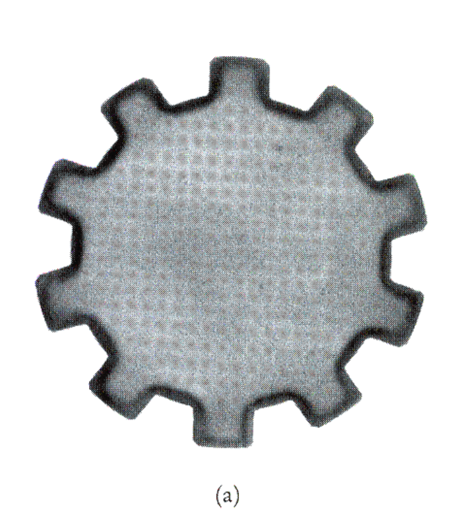
HK = 14.2 P/l²

Matériau	Dureté
Diamant	8
Nitrure de bore (BN)	5
Carbure de bore (B_4C)	3.5
Carbure de tungstène (WC)	2.7
Alumine (Al_2O_3)	2.1
Quartz (SiO_2)	1

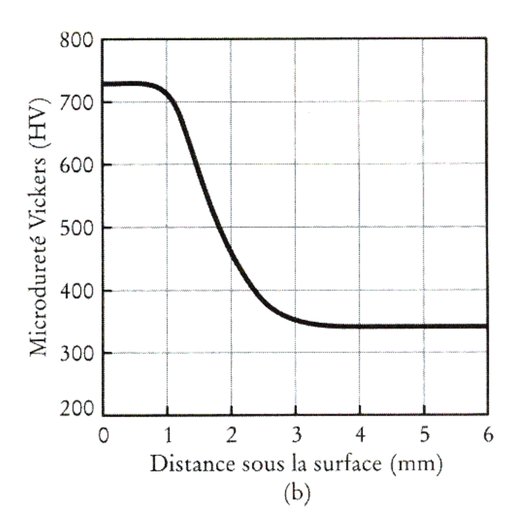


MEC-200

Trempe par induction d'un engrenage



(a)



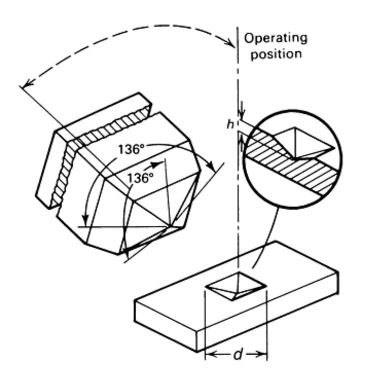
(b)

Figure 10.7 a) Influence d'une trempe superficielle par induction sur un arbre cannelé de boîte de vitesses. Les zones sombres superficielles ont une structure martensitique. b) Profil de dureté (de la surface vers le centre).

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Microdureté Vickers (HV)

$$HV = \frac{1.854 * F}{d^2}$$



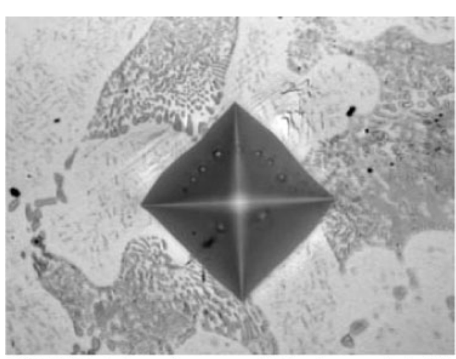


FIGURE 2 - Indentation on multiple phases of the Ni-Cr-Mo-Ti alloy. (Original magnification – 400 X).

Tableau 1.1 Caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté

Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diam.)	500 ou 3000 kgf	D; F; d	Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2})}$
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: 136°	5 à 100 kgf (microdureté: 5 à 1000 gf)	F	Diagonale de l'empreinte (d)	$HV = \frac{1{,}854\ F}{d^2}$
Rockwell C	Cône de diamant d'angle au sommet de 120°	Précharge f de 10 kgf; F = 150 kgf	f; f F; f; Z	Profondeur de l'empreinte (Z)	HRC = $f(Z)$
Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge f de 10 kgf; F = 100 kgf	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte (Z)	HRB = $f(Z)$

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



Avantages des essais de dureté

- Simples et bon marché
  - Pas d'éprouvettes spéciales (pas d'usinage)
  - Facilité d'utilisation et faible prix de l'équipement
- Non destructif
- La résistance à la traction peut être déduite des résultats de certains essais de dureté.
- Donne une idée de l'usure



Conversion de dureté

R_m (MPa) = 3.5 HB

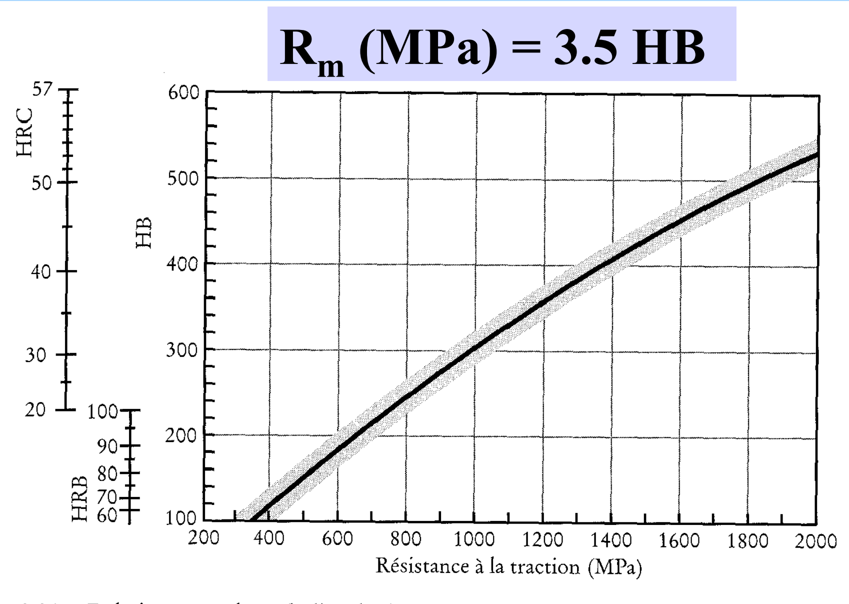


Figure 1.16 Relation entre les échelles de dureté Brinell, Rockwell C et Rockwell B, et la résistance à la traction des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés.

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



MEC-200

Autres essais mécaniques

- **Résilience :** Comportement au choc
- **Ténacité :** Résistance à la propagation des fissures ou énergie de déformation requise pour la rupture
- **Fluage :** Comportement à haute température sous charge constante
- **Fatigue :** Comportement sous charges variables



MEC-200

Essai d'impact (Résilience)

- Impact soudain et beaucoup plus intense
  - Vitesses de déformations de l'ordre de 10^3 s^{-1}.
- Matériaux aura un comportement beaucoup plus fragile



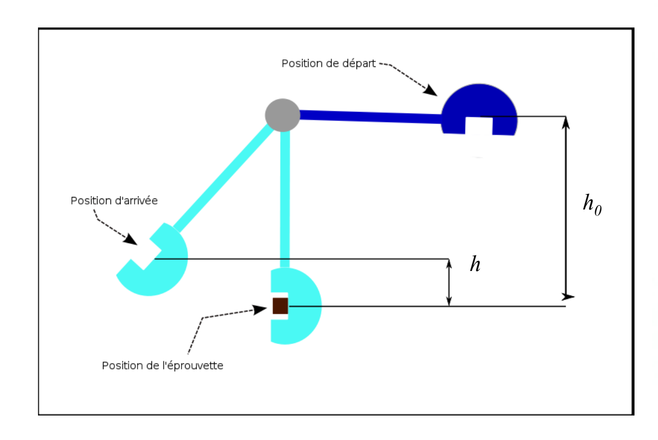
MEC-200

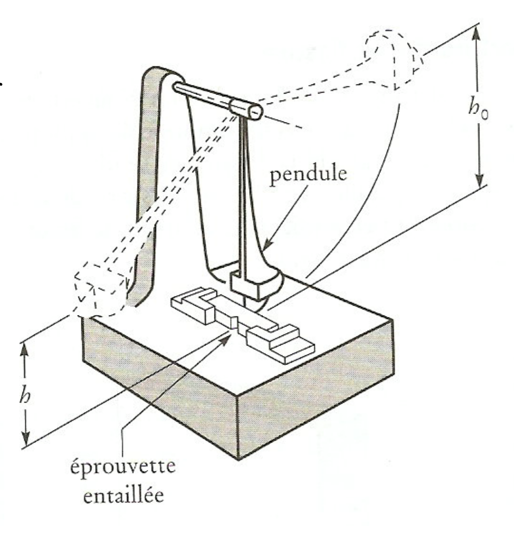
Essai d'impact (résilience)

La résilience est l'énergie nécessaire à rompre une pièce selon une section unité (J/cm²).

$$K = mgh_0 - mgh$$

ASTM E23 : Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials.



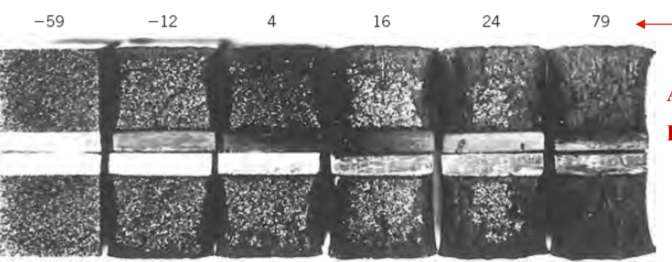


Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



MEC-200

Transition Fragile - ductile

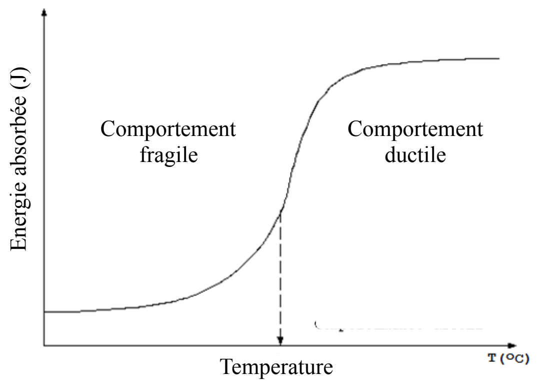


Temperature, ºC

Aço A36

Ensaio Charpy com entalhe

Energie absorbée essai Charpy en fonction de la temperature

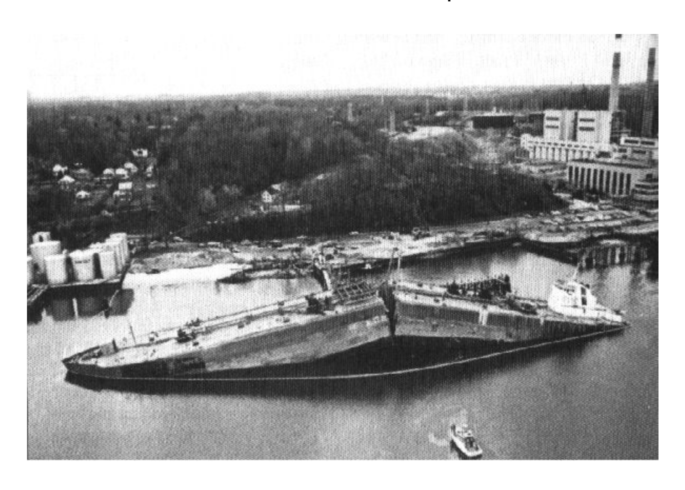


Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux



Transition Fragile-ductile

- On ne doit pas construire des structures en utilisant des matériaux qui présentent une température de transition fragile-ductile et au dessus de la température d'utilisation si nous voulons éviter les catastrophes



Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux

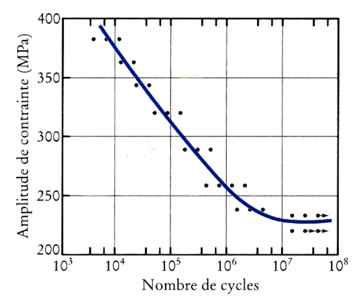


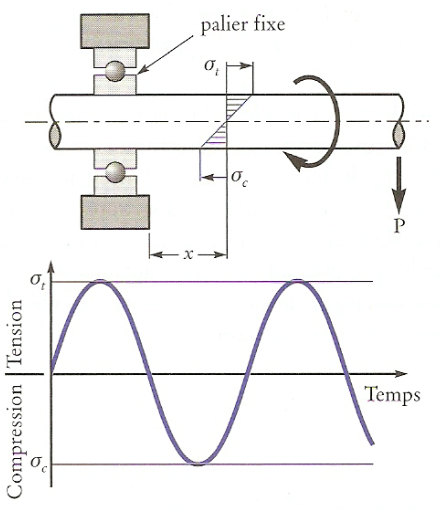
Essai Fatigue

La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau et peut mener à sa rupture.

3 étapes :

- Initiation de fissures
- Propagation des fissures
- Rupture finale



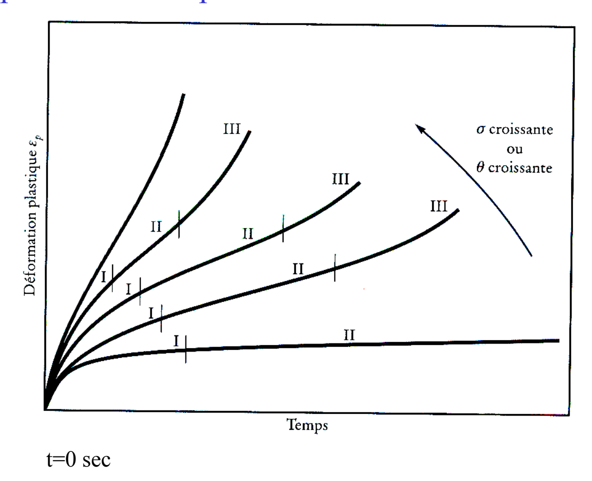


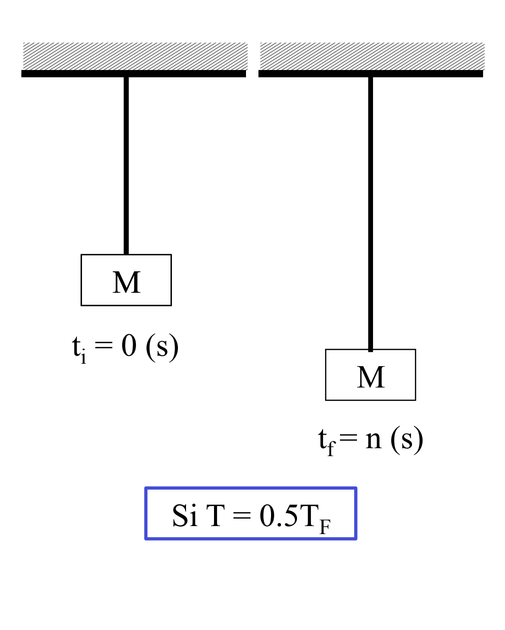
Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



Essai Fluage

Le fluage est le phénomène physique qui provoque la déformation irréversible d'un matériau soumis à une contrainte constante pendant un temps donné.



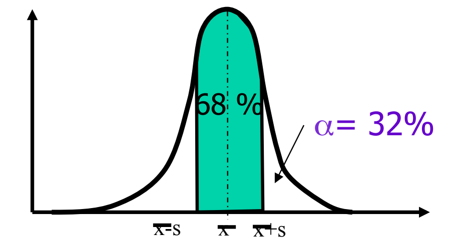




Variabilité des propriétés des matériaux et facteurs de sécurité

Les propriétés mesurées (E, Re, Rm, α, ρ etc) ne sont pas des grandeurs exactes !

- Causes d'erreurs : méthode d'essai, variation des procédés de fabrication des éprouvettes, erreur de l'opérateur et erreur d'étalonnage, variabilité dans le lot de matériaux testés.
- La valeur typique est la moyenne des données : $\bar{X}$.
- La dispersion ou l'écart-type est *s*.



$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$



Facteur de sécurité : N

- Pourquoi?
  - Le calcul des charges et contraintes est approximatif.
  - Les mesures des propriétés mécaniques des matériaux industriels sont dispersés.
- Contrainte sécuritaire : $\sigma_s = \dfrac{R_e}{N}$
- N = 1.2 à 4
  - Si N est très élevée, la pièce sera surdimensionnée.
  - N = fonction (prix, expérience, fiabilité des pièces, conséquences (mortelles, matérielles, financières) qu'entrainerait la rupture.



Plan du cours
Caractérisation des matériaux

- Propriétés mécaniques
  - Notions de contrainte et déformation
  - Caractérisation des propriétés mécaniques

  (traction, compression, flexion, dureté, impact, fatigue, fluage, facteur de sécurité)
- Caractérisation de la microstructure
  - Microscopie optique, transmission, balayage
- Autres propriétés
  - Densité
  - Dilatation, contrainte thermique, capacité calorifique, conductivité thermique
  - Propriétés électriques



MEC-200

Microstructure

- Les propriétés mécaniques (Re, Rm, A%) dépendent de la constitution du matériau :
  - Composition chimique,
  - Microstructure : organisation des phases (taille, forme, distribution).
- Appareils = microscopes
  - optique : 10 < grossissement < 1000; Résolution : r = 0.2 μm
  - électronique à balayage : 10 < grossissement < 10^5; r = 1 μm à 5 nm
  - à transmission : 1000 < grossissement< 10^6; r = 0.2 nanomètres



MEC-200

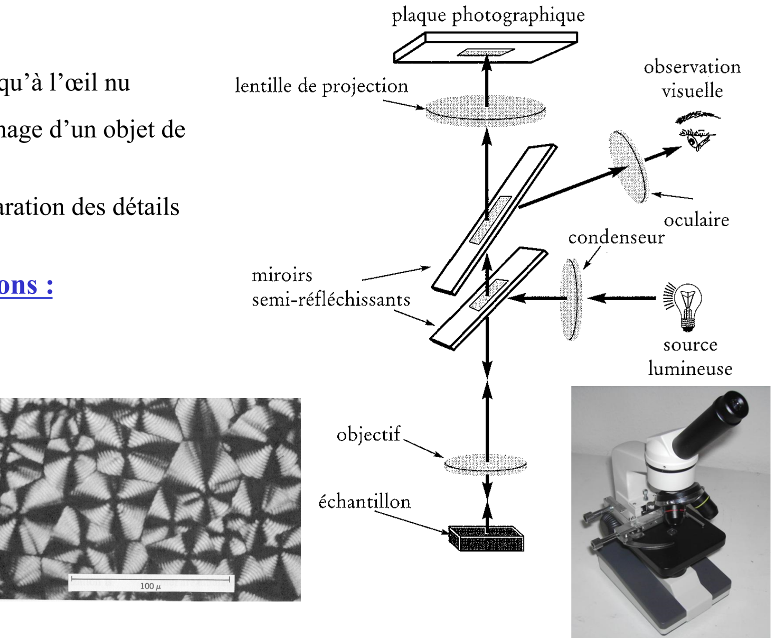
Microscope optique

Intérêt:

- Une meilleure observation qu'à l'œil nu
- Grossissement : grossir l'image d'un objet de très petite taille
- Pouvoir de résolution : séparation des détails d'une image 0.2 μm.

Préparation des échantillons :

- Sablage / Polissage
- Attaque chimique



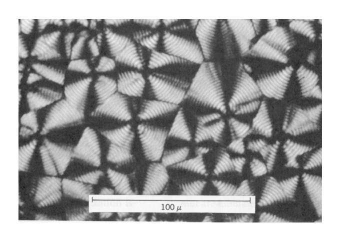
Polyethylene sous lumière polarisée

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux

Microscope optique

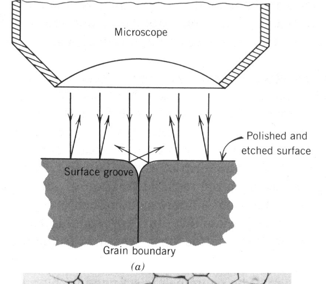
Préparation des échantillons:

- Sablage / Polissage
- Attaque chimique
- Coupe fine



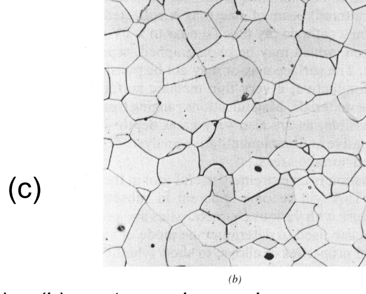
Polyethylene sous lumière polarisée

(a)



(b)

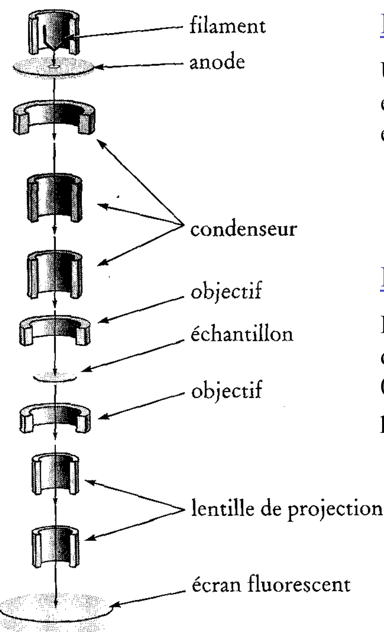
(c)



(a) e (b) contours des grains
(c) Image optique de grains de Fe-Cr. Aumento: 100X.

Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux

Microscope à transmission



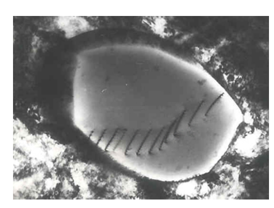
Principe

Un faisceau d'électrons est « transmis » à travers un échantillon très mince. Les effets d'interaction entre les électrons et l'échantillon donnent naissance à une image.

- Résolution : 0.2 nm.
- Grossissement : 300 000 X

Préparation des échantillons

Échantillons minces pour être transparent au faisceau d'électrons (Préparation des échantillons délicate). Exemples : 0.2 μm pour Al et 0.1 μm pour les aciers et 30 nm pour polymères

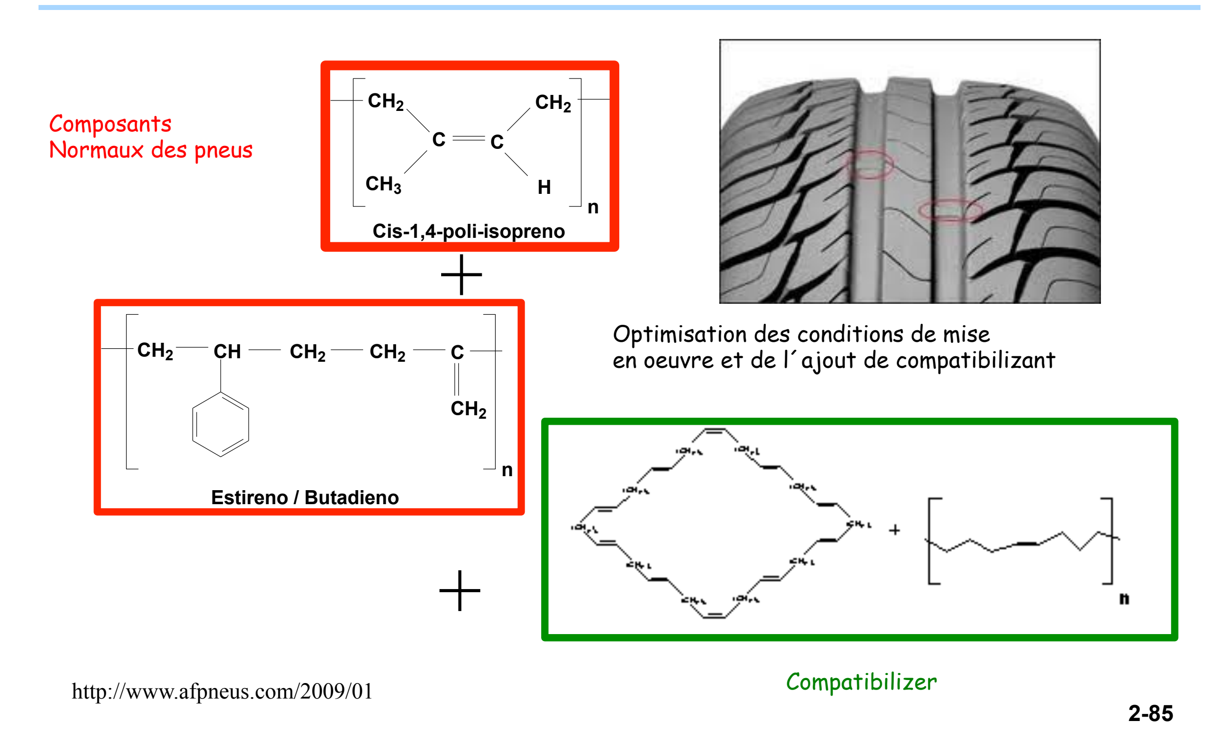


Dislocations

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux

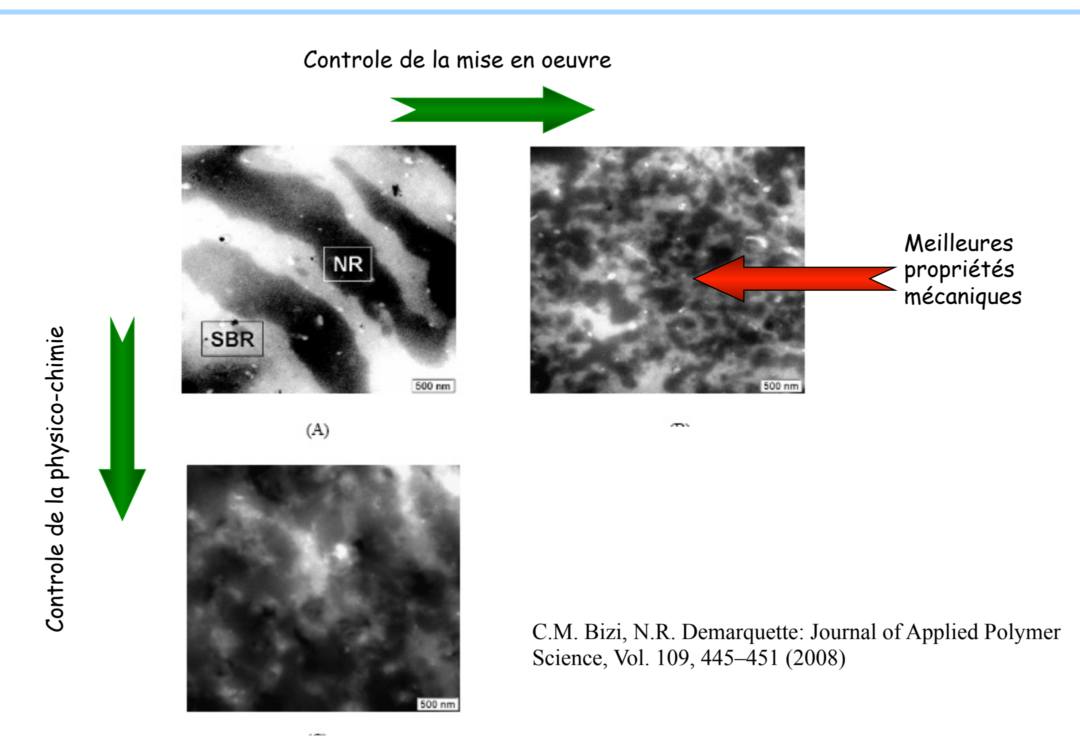
ÉTS Le génie pour l'industrie
MEC-200

Mélanges de polymères : applications mélange d´élastomères



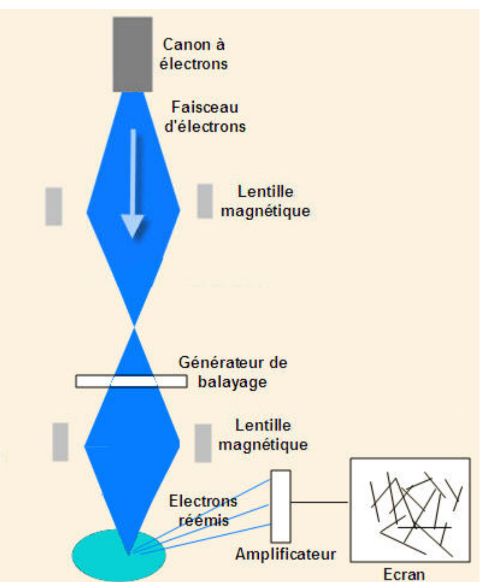
ÉTS Le génie pour l'industrie
MEC-200

Mélanges de polymères : applications mélange d´élastomères



C.M. Bizi, N.R. Demarquette: Journal of Applied Polymer Science, Vol. 109, 445–451 (2008)





Principaux organes d'un MEB (SEM)

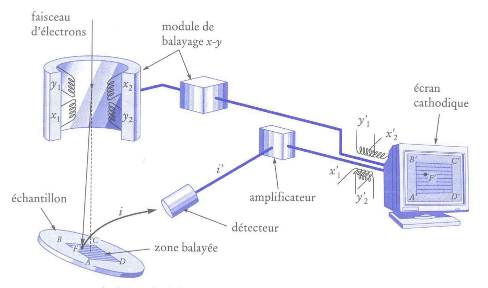
- Canon à électrons => produire une sonde électronique fine sur l'échantillon (energie entre 1 et 35 keV
- Jeux de lentilles
- Porte échantillon => déplacer l'échantillon dans les trois directions.
- Module de balayage
- Détecteurs => capter et d'analyser les rayonnements émis par l'échantillon.
- Pompe à vide

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



MEC-200

Microscope électronique à balayage (MEB) Principe de formation de l' image



– x_1, x_2, y_1 et y_2 : bobines de déflexion du faisceau d'électrons (balayage x-y)
– x'_1, x'_2, y'_1 et y'_2 : bobines de déflexion du faisceau d'électrons de l'écran cathodique (balayage x-y)
– $ABCD$: région balayée sur l'échantillon
– $A'B'C'D'$: région balayée par le spot sur l'écran cathodique
– i : intensité du signal émis par l'échantillon
– i' : intensité du spot sur l'écran ; $i' \propto i$

Figure 1.21 Représentation schématique de la reconstitution d'une image au MEB : à tout point F de l'échantillon correspond un point F' sur l'écran. Le grossissement final de l'image est égal au rapport $A'D'/AD$.

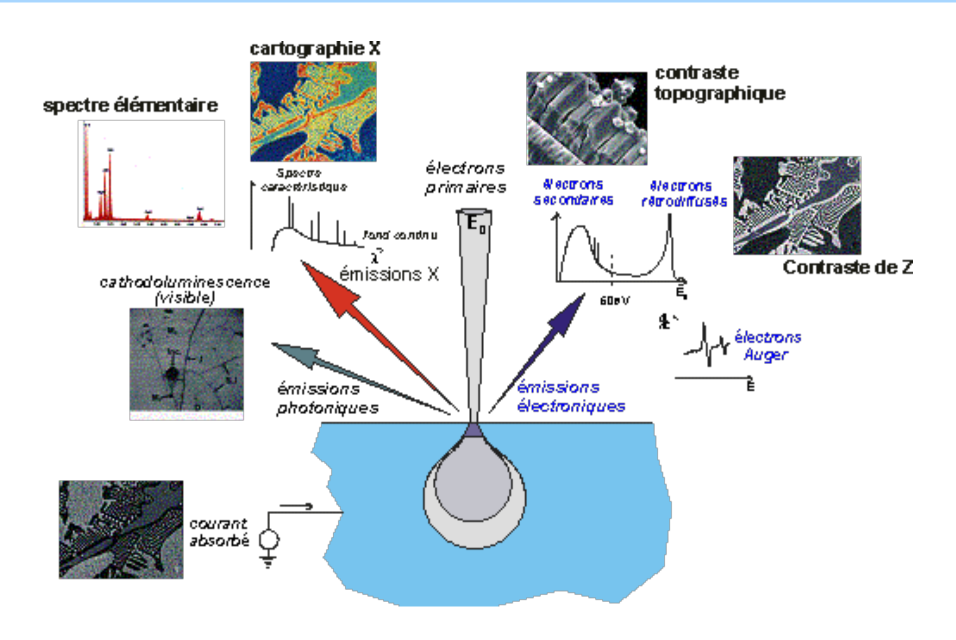
- Faisceau d'électrons est focalisé sur l'échantillon et le balaie
- Les électrons sont réémis et leur intensité depends de l'orientation et composition chimique des éléments
- Ces électrons sont captés par un détecteur
- Image reconstruite sur l'écran cathodique ligne par ligne
- La brillance sur l' écran cathodique dépends de l'intensité des électrons réemis
- On forme une image en noir et blanc

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



MEC-200

Interaction électrons-matière





MEC-200

Interaction électrons-matière

faisceau d'électrons incidents (énergie E_0)

α e_r e_A e_s RX e_t

résentation schématique de l'interaction entre un faisceau d'électrons primaires n échantillon ; e_r : électrons rétrodiffusés ; e_s : électrons secondaires ; e_A : élec- s Auger ; e_t : électrons transmis ; RX : rayons X.

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux

- Electrons rétrodiffusés
  - Proviennent d'un volume de l' échantillon de forme sphérique dont le diamêtre est d' autant plus grand que Z est petit
  - 4,2 µm pour Al Z=13 et 0,9 µm pour Au
  - Coefficient de rétrodiffusion, η, plus grand pour Z plus grand, il croit si α augmente
  - On peut avoir des topographies et voir des différences de Z (résolution de la taille du volume sphérique) (µm)
- Electrons secondaires
  - Topographie
  - Crées par intéractions des e⁻ avec les électrons des couches de valances
- Rayons X
  - Interaction avec des électrons des couches électroniques plus profondes.
  - Leur énergie dépend de Z (analyse chimique_
  - Profondeur de qq μ^3
- Electrons Auger.
  - Idem RX mais qq couches atomiques



MEC-200

Microscope électronique à balayage (MEB)

Préparation des échantillons :

- Aucune si échantillon conducteur

- Métallisation (couche d'or ou de carbone de 10 à 20 nm) si l'échantillon et non conducteur (céramiques) ou polymères.

- Les surfaces de rupture peuvent être examinées sans préparation si l'échantillon est conducteur.

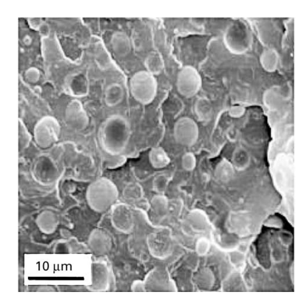
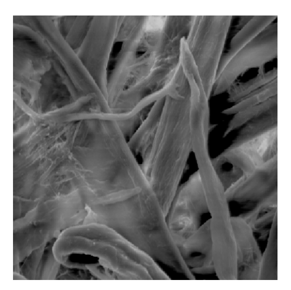


Fig. 1. Morphology of PP/HDPE (80/20) blend after compression molding.



Fibres de papier

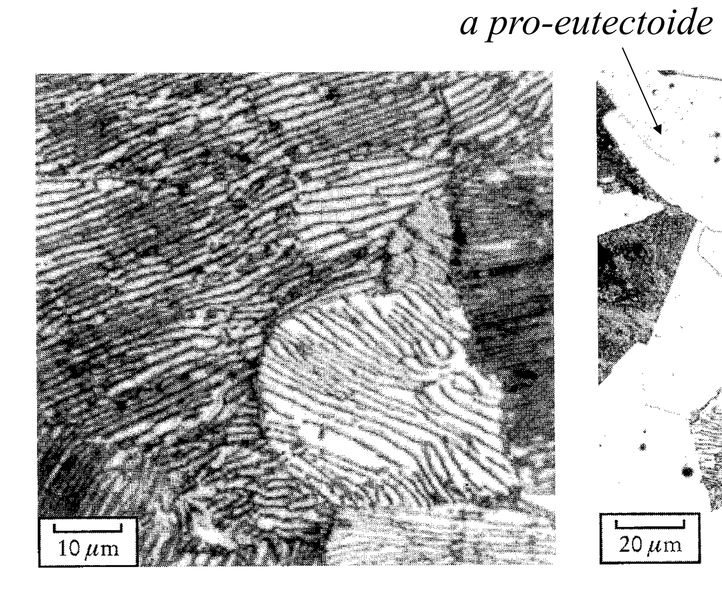
A.M.C. Souza, N.R. Demarquette / Polymer 43 (2002) 1313–1321

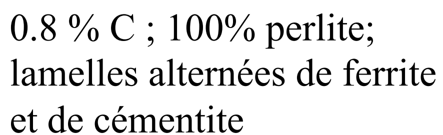
Source: Tan I.H, Silva ML.P, Demarquette N.R.D. Journal of Materials Chemistry, 11, 1019-1025, 2001

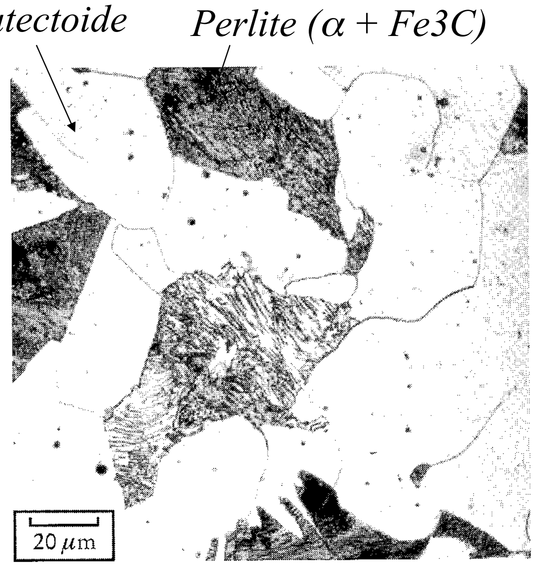


Fig. 5.17 Microstructure d' alliage Fe-C

a pro-eutectoide *Perlite (α + Fe3C)*



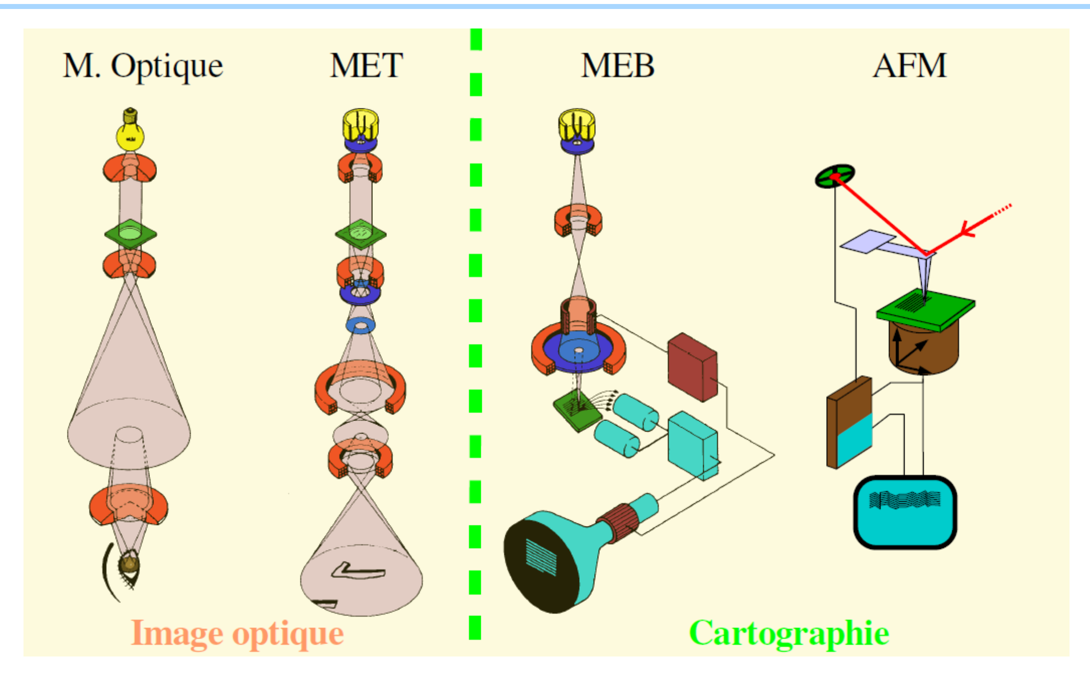

0.8 % C ; 100% perlite; lamelles alternées de ferrite et de cémentite



0.2 % C ; 25 % perlite; 75% ferrite pro-eutectoïde



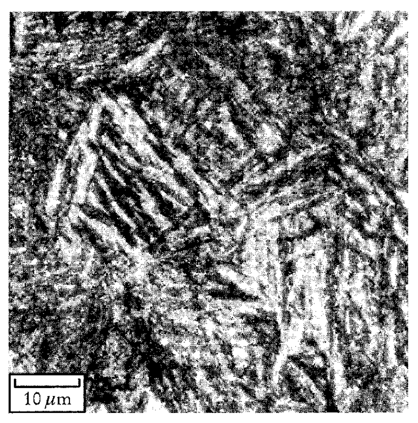
Complémentarité



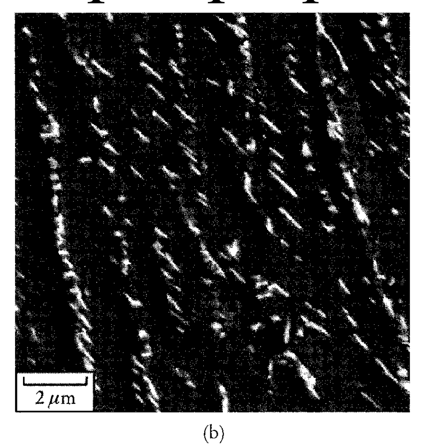


La bainite vue au MEB et au microscope optique

Micro. optique



(a)



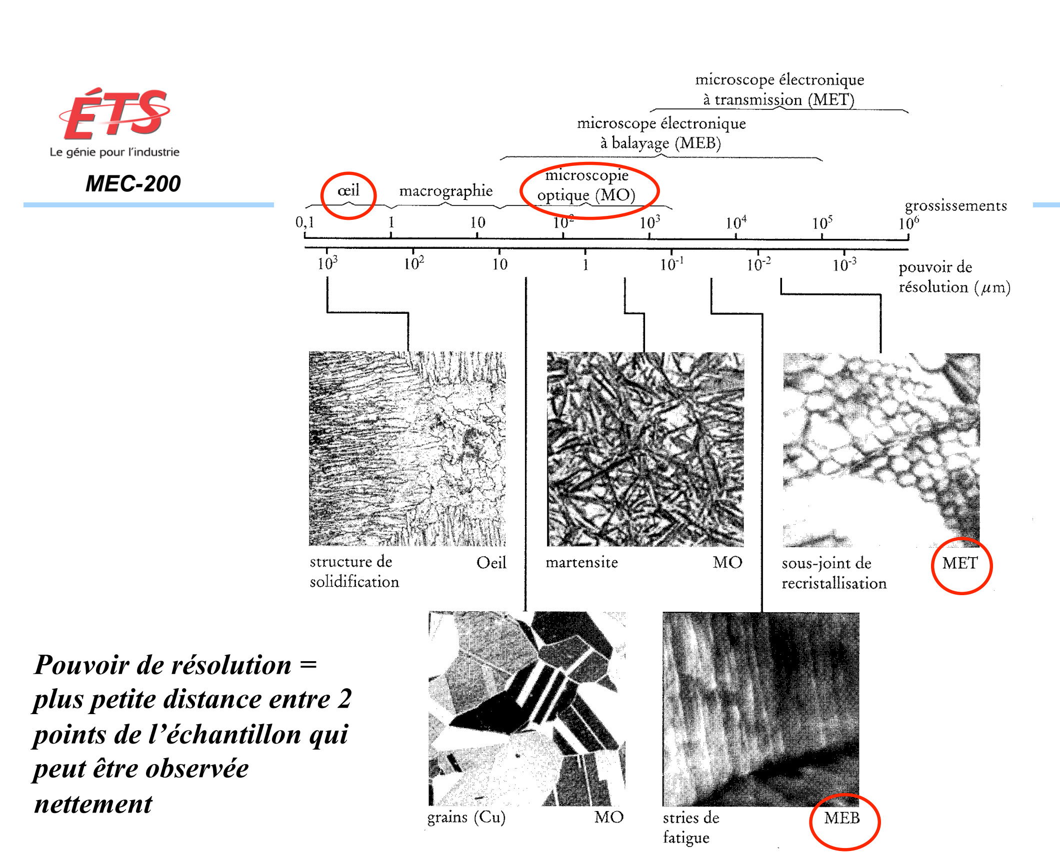
(b)

MEB

Figure 6.21 a) Microstructure de la bainite supérieure vue au microscope optique ; b) bainite supérieure observée au microscope électronique à balayage (la ferrite est sombre, les carbures de fer sont clairs).

Dureté:

Bainite (42-58RC)
ferrite (15-41RC)
Martensite (+de 58RC)



Pouvoir de résolution = plus petite distance entre 2 points de l'échantillon qui peut être observée nettement

Figure 1.17 Grossissements et pouvoir de résolution des instruments d'étude de la microstructure.

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux



MEC-200

Plan du cours
Caractérisation des matériaux

- Propriétés mécaniques
  - Notions de contrainte et déformation
  - Caractérisation des propriétés mécaniques

  (traction, compression, flexion, dureté, impact, fatigue, fluage, facteur de sécurité)
- Caractérisation de la microstructure
  - Microscopie optique, transmission, balayage
- Autres propriétés
  - Densité
  - Dilatation, contrainte thermique, capacité calorifique, conductivité thermique
  - Propriétés électriques



MEC-200

On peut vouloir utiliser un matériau pour ses propriétés fonctionnelles autres que ses propriétés mécaniques!

Principales propriétés physiques

- Thermique
- Électrique
- Magnétique



MEC-200

Plan du cours
Caractérisation des matériaux

- Propriétés mécaniques
  - Notions de contrainte et déformation
  - Caractérisation des propriétés mécaniques

  (traction, compression, flexion, dureté, impact, fatigue, fluage, facteur de sécurité)
- Caractérisation de la microstructure
  - Microscopie optique, transmission, balayage
- Autres propriétés
  - Densité
  - Dilatation, contrainte thermique, capacité calorifique, conductivité thermique
  - Propriétés électriques



MEC-200

Masse volumique ρ ou densité

Matériaux	ρ (g/cm3)
alliages aluminium	2,7-2,8
cuivre	8,75-8,94
aciers	7,8-8
fonte	7,1-7,3
titane	4,5
magnesium	1,7-1,8
béton	2,4
diamant	3,51
polymères	0,9-2,17

$$\rho = \frac{m}{V} \left(g/_{cm^3} \right)$$

Caractéristique du matériau

Dépend de l'architecture cristalline et de la masse molaire (M), volume de la maille élémentaire (V_m) et nombre d'atomes/maille (N_a)

$$\rho = \frac{nM}{N_a V_m}$$



Plan du cours
Caractérisation des matériaux

- Propriétés mécaniques
  - Notions de contrainte et déformation
  - Caractérisation des propriétés mécaniques

  (traction, compression, flexion, dureté, impact, fatigue, fluage, facteur de sécurité)
- Caractérisation de la microstructure
  - Microscopie optique, transmission, balayage
- Autres propriétés
  - Densité
  - Dilatation, contrainte thermique, capacité calorifique, conductivité thermique
  - Propriétés électriques



Capacité thermique (C_p)

Capacité thermique : quantité d'énergie (J) nécéssaire pour augmenter d'un degré la température de ume mole de matériau. Cette propriété represente la capacité d'un matériau d'absorber l'énergie du milieu extérieur.

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

ou : C est la capacité thermique molaire (J/mol.K)

dQ est la variation d' énergie (J)

dT est la variation de température (K)

- Fréquemment on utilise la chaleur spécifique, capacité thermique par unité de masse (J / kg.K).
- Due à l' augmentation de l' énergie de vibration des atomes



Capacité thermique (C_p)

- La capacité thermique (C_p) est donc la possibilité qu'a un matériau d'absorber (ou restituer) de l'énergie par échange thermique lorsque sa température varie.

Matériau	Al	Fe	Cu	Al_2O_3	Verre	PEHD	Nylon
Cp (J/kg.K)	900	448	386	775	840	1850	1670



Dilatation thermique

- La plupart des matériaux se dilatent en se réchauffant et se contractent en se refroidissant
- Coefficient linéaire de dilatation thermique α (°C^{-1})

$$\frac{\ell_f - \ell_0}{\ell_0} = \alpha_\ell (T_f - T_0) \qquad \text{ou} \qquad \frac{\Delta \ell}{\ell_0} = \alpha_\ell \Delta T$$

Matériau	Al	Cu	Fe	Acier 1025	Al_2O_3	SiO_2	Polymère	Alliages Fe-Ni (INVAR)
α (10^{-6}/°C)	23,6	17	11,8	12	7,6	0,4	>50	1.6



Contraintes thermiques

- Contraintes thermique dues à la dilatation

En cas de chauffage,

- Si le matériau est libre de s'allonger => apparition de déformations

$$\varepsilon = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0\left(1+\alpha\Delta T\right)-L_0}{L_0} = \alpha\Delta T$$

- Si le matériau est bloqué => apparition de contraintes

$$\sigma = E\alpha_1\left(T_0 - T\right) = E\alpha_1\Delta T$$

- En cas de chauffage non uniforme (local)→ choc thermique
  - Initiation
  - Propagation de fissure

On définit : résistance au choc thermique RCT≈ Rm/ αE



Conductivité thermique (k)

- La conductivité thermique (k) est la propriété des matériaux à transmettre la chaleur d'une zone de haute température à une zone de basse température.
- Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps (W/m^2) sous un gradient de température.
- Mécanismes de la conduction
  - Déplacement des phonons (= ondes de vibration)
  - Déplacement des électrons libres
    - Chaleur => agitation thermique => mouvement des électrons => migration vers zone plus froide => libération d'énergie par collision

Matériau	Al	Fe	Cu	Al_2O_3	Verre	PEHD	Nylon
k (W/m.K)	247	80	398	39	1.7	0.5	0.24



MEC-200

Plan du cours
Caractérisation des matériaux

- Propriétés mécaniques
  - Notions de contrainte et déformation
  - Caractérisation des propriétés mécaniques

  (traction, compression, flexion, dureté, impact, fatigue, fluage, facteur de sécurité)
- Caractérisation de la microstructure
  - Microscopie optique, transmission, balayage
- Autres propriétés
  - Densité
  - Dilatation, contrainte thermique, capacité calorifique, conductivité thermique
  - Propriétés électriques



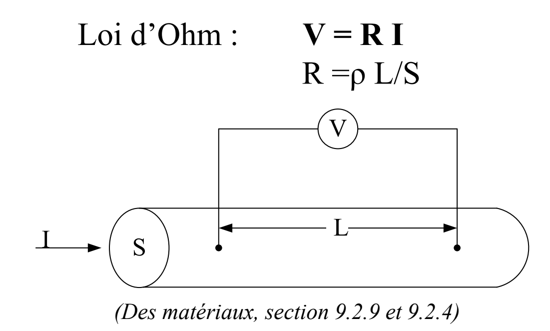
MEC-200

Conductivité et résistivité électrique (σ et ρ)

- La conductibilité électrique (σ) est la propriété des matériaux à laisser les charges électriques se déplacer librement (permettre le passage du courant électrique) (Siemens/m)(S/m)
- La résistivité électrique (ρ) d'un matériau représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. (**Ω.m)**

Loi d'Ohm : **V = R I**

R =ρ L/S



(Des matériaux, section 9.2.9 et 9.2.4)

$$\rho = \frac{V \cdot S}{I \cdot L} = \frac{1}{\sigma} \quad [\mu\Omega \cdot cm]$$

V = volt
I = ampère
S = cm^2
L = cm



MEC-200

Quelques valeurs de ρ

Matériaux	Résistivité (Ω.m)
Aciers ordinaires et alliés	$1{,}6 - 2{,}48 \quad 10^{-7}$
Inox	$6 - 8{,}3 \quad 10^{-7}$
Fontes	$6\text{-}15 \quad 10^{-7}$
Alliages aluminium	$2{,}9 – 5{,}2 \quad 10^{-7}$
Alliages de cuivre	**$1{,}7 – 37{,}5 \quad 10^{-8}$**
Béton	10^{+9}
Diamant	10^{+14}
Nitrure de silicium	$> 10^{+12}$
Alumine	$> 10^{+12}$
Polymères	$> 10^{+8}$



MEC-200

Quelques valeurs de ρ

Matériaux	Résistivité (Ω.m)
Aciers ordinaires et alliés	$1{,}6 - 2{,}48 \quad 10^{-7}$
Inox	$6 - 8{,}3 \quad 10^{-7}$
Fontes	$6\text{-}15 \quad 10^{-7}$
Alliages aluminium	$2{,}9 – 5{,}2 \quad 10^{-7}$
Alliages de cuivre	**$1{,}7 – 37{,}5 \quad 10^{-8}$**
Béton	10^{+9}
Diamant	10^{+14}
Nitrure de silicium	$> 10^{+12}$
Alumine	$> 10^{+12}$
Polymères	$> 10^{+8}$

Matériau	Al	Fe	Cu	Al_2O_3	Verre	PEHD	Nylon
k (W/m.K)	247	80	398	39	1.7	0.5	0.24



MEC-200

Signification de la résistivité électrique (ρ)

P= RI² =(ρ L/S) I²

Quantité de chaleur dégagée (perte d'énergie)

Éléments	ρ (10^{-7} Ω.m)
Fe	10
Cu	2
Al	3
Ni-20Cr	110
Fe-35Ni-18Cr	100

- ρ faible : bon conducteur électrique :
(Si ρ= 0 , P = 0, pas de perte par effet Joule : supraconducteur (conducteur parfait) :

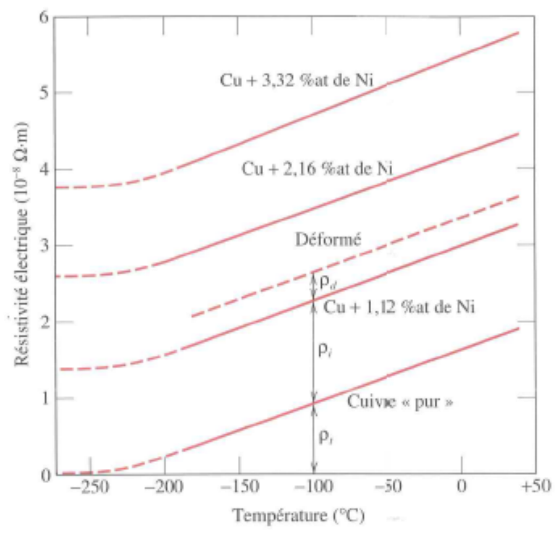
- ρ ↑: Élément chauffant :

** Le Cu est un bon conducteur électrique (fil électrique !!!) par rapport à l'alliage Ni-20Cr (élément chauffant !!!)



MEC-200

Résistivité électrique (ρ)



$$\rho_{total} = \rho_{thermique} + \rho_{impureté} + \rho_{déformation}$$

Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux



Isolant électrique (diélectrique)

- Les isolants électriques sont des matériaux dont la résistivité est extrêmement élevée.
- On compte parmi ces matériaux les céramiques et de nombreux plastiques. Par exemple, un câble électrique (matériau métallique) est souvent protégé d'un revêtement diélectrique (plastique).



Qu'avons-nous appris?

- À définir les contraintes et les déformations
- À interpréter la courbe de traction
- À déduire les propriétés mécaniques d'un matériau : module de Young, limite d'écoulement, résistance mécanique, ductilité etc.
- A différentier contraintes d'ingénierie et réelles et à savoir quand les utiliser
- Les propriétés des matériaux ne sont pas des valeurs exactes; penser à utiliser un coefficient de sécurité (N)
- A nommer et décrire les essais de dureté
- Méthodes d'analyse microstructurale des métaux
- Connaître la signification des autres caractéristiques mesurables et savoir les retrouver dans des tables